

Министерство образования и науки  
Российской Федерации  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

# Ф И З И К А   К О С М О С А

Труды 41-й Международной  
студенческой научной конференции

Екатеринбург

30 января — 3 февраля 2012 г.

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2012

УДК 524.4  
Ф503

Печатается по решению  
организационного  
комитета конференции

**Редколлегия:**

П. Е. Захарова (ответственный редактор), Э. Д. Кузнецов, А. Б. Островский, С. В. Салий, А. М. Соболев (Уральский федеральный университет), К. В. Холшевников (Санкт-Петербургский государственный университет), Б. М. Шустов (Институт астрономии РАН)

**Физика Космоса** : Тр. 41-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 30 янв. — 3 февр. 2012 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. — 296 с.

ISBN 978-5-7996-0666-4

В сборнике представлены доклады и сообщения студенческой научной конференции, которая ежегодно проводится в Астрономической обсерватории Уральского федерального университета. Цель конференции — обобщить достижения в области астрономии и астрофизики и способствовать формированию навыков и способностей молодых исследователей.

Сборник предназначен для профессиональных астрономов и физиков, студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

**УДК 524.4**

ISBN 978-5-7996-0666-4

© Уральский федеральный  
университет, 2012

**ФИЗИКА КОСМОСА**  
**41-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СТУДЕНЧЕСКАЯ**  
**НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

**Организаторы**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ**  
**РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Международная общественная организация  
«АСТРОНОМИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО»

**УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
Кафедра астрономии и геодезии  
Астрономическая обсерватория

**30 января — 3 февраля 2012 г.**

**Екатеринбург, Россия**

**Научный организационный комитет:**

К. В. Холшевников (председатель, Санкт-Петербургский государственный университет), П. Е. Захарова (Уральский федеральный университет), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН), В. Ф. Есипов (ГАИШ МГУ), И. И. Зинченко (ИПФ РАН), Э. Д. Кузнецов (Уральский федеральный университет), М. Г. Мингалиев (САО РАН), В. В. Орлов (НИАИ СПбГУ), А. Б. Островский (Уральский федеральный университет), А. М. Соболев (Уральский федеральный университет), Б. М. Шустов (Институт астрономии РАН)

## **Жюри конкурса студенческих научных работ**

К. В. Холшевников (председатель, Санкт-Петербургский государственный университет), П. Э. Боли (Институт астрономии общества Макса Планка, Германия), А. И. Васюнин (Университет Вирджинии, США), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН), В. В. Орлов (Научно-исследовательский астрономический институт СПбГУ), А. Б. Островский (Уральский федеральный университет)

## **Финансовая поддержка**

Российский фонд фундаментальных исследований

Отдел по делам молодежи администрации Октябрьского района  
г. Екатеринбурга

Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

## Материалы конференции



*Septem artes liberales.*  
*Гравюра. XV в.*



# Обзорные лекции

**П. Э. Боли**

Институт астрономии общества Макса Планка (MPIA),  
Германия

## ЕВРОПЕЙСКАЯ ЮЖНАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ И ТЕЛЕСКОПЫ VLT НА ПАРАНАЛЕ

Одним из важнейших в мире наблюдательных комплексов являются телескопы Very Large Telescope (VLT) Европейской южной обсерватории (ESO) на Серро Параналь. В данной обзорной лекции дается характеристика организации ESO и телескопов VLT и приводится небольшая выборка научных работ. Особое внимание уделяется вопросу важности телескопов VLT для российских ученых и перспективам использования данных из ESO и VLT сегодня и в будущем.

The Very Large Telescope (VLT) of the European Southern Observatory (ESO) on Cerro Paranal is one of the most influential observing complexes in the world. In this overview lecture, an introduction to the ESO organization and VLT telescopes is presented, along with a small selection of scientific works. Particular attention is given to the importance of the VLT for the Russian scientific community, as well as to present and future perspectives for making use of ESO and VLT data.

### Введение

Определяющим инструментом для космических исследований всегда являлась астрономическая обсерватория. Первые, простые с технической точки зрения обсерватории были построены отдельными исследователями или небольшими группами людей. Позже такой задачей, ввиду усложнения требований к точности и чувствительности приборов, могли заниматься только институты или университеты или даже группы, состоящие из нескольких институтов. В наши дни это зачастую дело международное, к которому присоединяются не только отдельные единицы-институты, но даже целые национальные академии и министерства.

Самой большой организацией, занимающейся построением телескопов и обсерваторий, а также их управлением, является Европейская южная обсерватория ESO (European Southern Observatory, полное название — European Organization for Astronomical Research in the Southern Hemisphere), созданная в 1962 г. В данный момент в нее входят 15 стран — Австрия, Бельгия, Бразилия, Великобритания, Германия, Дания, Испания, Италия, Нидерланды, Португалия, Финляндия, Франция, Чехия, Швейцария и Швеция. Бюджет ESO составлял 163.2 млн евро в 2010 г., а число рабочих и сотрудников — около 730 человек [1].

Как правило, страны ESO участвуют в организации на условиях оплаты вступительных и членских взносов, есть также другие оговоренные условия (например, разработка детекторов или оптических элементов). Членство в ESO позволяет ученым соответствующих стран и институтов бесплатно публиковать свои работы в рецензируемом журнале *Astronomy and Astrophysics* и получать полную финансовую поддержку при проведении наблюдений в обсерваториях организации. Другими словами, все астрономы институтов — членов ESO, от студентов до профессоров, могут (при принятой заявке!) бесплатно приезжать в обсерватории Чили, проводить свои наблюдения и публиковать их результаты в признанном журнале без каких-либо грантов или отчетов, что для обычного ученого, конечно, очень удобно.

Данная обзорная лекция посвящена лишь одному из наблюдательных комплексов в чилийской пустыне Атакама, которыми управляет ESO: телескопам VLT на Серро Параналь (высота 2 600 м). Помимо телескопов VLT на Паранале также расположены обзорные телескопы VISTA и VST. Кроме Паранальской обсерватории в список инструментов ESO входят несколько оптических телескопов на пике Ла-Силья (высота 2 400 м) и 12-м субмиллиметровый телескоп APEX на пике Чайнантор (высота 5 100 м). И наконец, ESO является партнером в международном проекте ALMA, который будет представлять собой интерферометр из 66 радиотелескопов (в настоящее время предварительные научные наблюдения уже начались и построена примерно одна треть всего массива).



# Телескопы VLT

## Общие сведения

Как уже отмечалось, телескопы VLT расположены на пике Параналь на высоте 2 600 м. Сам пик Параналь находится на  $24^{\circ}38'$  ю. ш.  $70^{\circ}24'$  в. д., примерно в 12 км от побережья Тихого океана. Здесь сверхнизкий уровень атмосферных осадков (меньше 10 мм в год), и по виду это место очень напоминает планету Марс. Такие погодные условия способствуют наблюдениям на всех длинах волн, особенно в инфракрасном диапазоне; устойчивость атмосферы позволяет *регулярно* достигать качества изображения до  $0,7''$  и иногда лучше  $0,5''$ . Кроме того, расположение обсерватории в южном полушарии очень удобно для наблюдения источников в направлении внутренней части Галактики.

VLT, несмотря на свое название (Very Large Telescope), на самом деле состоит не из одного, а из восьми оптических телескопов: четырех неподвижных диаметром 8.2 м и четырех подвижных диаметром 1.8 м. Большие телескопы называются UT1, UT2, UT3, UT4 (UT — Unit Telescope), а маленькие — AT1, AT2, AT3, AT4 (AT — Auxiliary Telescope). Первый 8-м телескоп начал свою работу в 1998 г., последний — в 2000 г. Все телескопы UT оснащены полным комплектом научных приборов и большую часть времени работают независимо друг от друга, хотя телескопы AT специально предназначены для функционирования только в интерферометрическом режиме и имеют оборудование лишь для этой конкретной задачи.

На рисунке показано расположение телескопов и интерферометрических станций на Паранале. Для работы в интерферометрическом режиме подземная система оптических туннелей позволяет направлять свет из телескопов UT и 30 станций для телескопов AT в одну точку в комнате приборов. Подвижные телескопы AT располагаются по этим станциям в зависимости от требований покрытия фазовой плоскости *uv*. При обычном порядке работы, техники два раза в неделю перемещают один из телескопов по очереди, таким образом постепенно меняя конфигурацию.

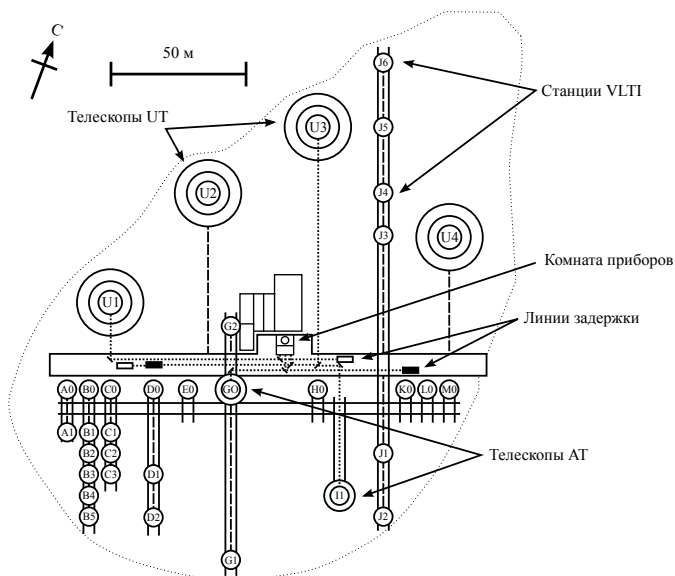


Схема расстановки телескопов и интерферометрических станций на VLT. В данном виде два телескопа АТ стоят на станциях G0 и I1. Точечной линией показан путь оптических лучей от двух 1.8-м телескопов АТ и двух 8.2-м телескопов UT1, UT3, которые сходятся в комнате приборов для наблюдения в интерферометрическом режиме

## Приборы и режимы наблюдений

Полный список приборов организации ESO, установленных на телескопах VLT в текущее время, перечислен в таблице. Кроме этих основных (обсерваторских) инструментов астрономы также могут привезти свою аппаратуру для временного подключения к местным системам.

Как видно из таблицы, наблюдения проводятся в различных режимах (включая прямые снимки, спектроскопию, интегральное поле, поляриметрию, коронографию и интерферометрию) в диапазонах от ближнего ультрафиолетового до среднего инфракрасного. Соответственно список реализуемых задач довольно широкий; в 2010 г. количество рецензируемых публикаций на основе данных с VLT составило 507, а с 1999 по 2010 г. — 3 669. В число наиболее цитируемых работ входят измерения замедления расширения Вселенной [2], на-

## Приборы для наблюдений на телескопах VLT

Название прибора	Телескоп	Режимы наблюдения	Спектральный диапазон	Спектральное разрешение
CRILES	UT1	Спектроскопия	0.92—5.2 мкм	До 100 000
FLAMES	UT2	Многообъектная спектроскопия	370—950 нм	5600—46 000
FORS2	UT1	Прямые снимки, поляриметрия, спектроскопия	330—1100 нм	100—400
HAWK-I	UT4	Прямые снимки	0.85—2.5 мкм	—
ISAAC	UT3	Прямые снимки, спектроскопия	1—5 мкм	200—10 000
NACO	UT4	Прямые снимки, поляриметрия, коронография, спекл-интерферометрия	0.45—2.5 мкм	400—1100
SINFONI	UT4	Спектроскопия (интегральное поле)	1.1—2.45 мкм	1500—4000
UVES	UT2	Спектроскопия	300—1100 нм	До 110 000
VIMOS	UT2	Прямые снимки, спектроскопия (многообъектная, интегральное поле)	360—1000 нм	180—2500
VISIR	UT3	Прямые снимки, спектроскопия	8—24.5 мкм	До 25 000
XSHOOTER	UT2	Спектроскопия	300—2500 нм	До 14 000
AMBER	VLTi	Интерферометрия	1.05—2.4 мкм	До 12 000
MIDI	VLTi	Интерферометрия	8—13 мкм	30—230

*Примечание.* Спектральное разрешение определяется как  $\lambda/\Delta\lambda$ . Интерферометрические инструменты VLTi (AMBER, MIDI) могут работать с любыми телескопами UT или AT. В списке приведены только общедоступные приборы.

блюдения звезд на орбитах вокруг сверхмассивной черной дыры в центре Галактики [3], изучение оптического (в покое) спектра галактик типа лаймановского скачка [4], наблюдения звезд с очень низкой металличностью [5] и др.

### Интерферометр VLTi

Помимо стандартных режимов наблюдения одной из главных задач телескопов VLT являются интерферометрические наблюдения. Массив телескопов, работающих в этом режиме, называется VLTi (Very Large Telescope Interferometer). В данном случае интерферометр представляет собой объединение двух — четырех телескопов

VLT (включая как 8.2-м телескопы UT, так и 1.8-м телескопы AT). Пучок лучей от телескопов направляется через систему зеркал в подземных туннелях и сходится в комнате интерферометрических приборов (см. рисунок). Там записывается картина интерференции (в отличие от радиоинтерферометров с гетеродинными детекторами, где интерференционный узор строится не в реальном времени), из которой определяется коррелированный поток во время обработки данных. Таким образом извлекается сигнал, соответствующий шкалам  $\lambda/2B$ , где  $\lambda$  — длина волны;  $B$  — расстояние между двумя телескопами, составляющими интерферометр. На длине волны 10 мкм при базисе 100 м, например, достигнутое пространственное разрешение составляет  $0.01''$  (10 а. э. на расстояние 1 кпк).

## Наблюдения на VLT

### Заявки

Чтобы получить возможность наблюдения на любых телескопах VLT, нужно подать заявку на наблюдательное время. ESO делит наблюдения на два периода, которые начинаются в апреле и в октябре. На эти полугодия объявляются конкурсы, заявки принимаются до конца сентября и марта соответственно. На каждый период подаются около 2000 заявок, что превышает общее наблюдательное время примерно в три раза. Кроме того, для срочных программ в рамках резервного времени директора заявки принимаются на рассмотрение в любое время года.

Заявки ESO должны быть лаконичными и содержать четкое научное обоснование в пределах двух страниц. В заявке должны быть подробно описаны количественные оценки суммарного наблюдательного времени, ожидаемых уровней сигнала и т. п. Заявки рассматривает международный комитет, в который входят 15—20 ученых из разных институтов. Задача комитета состоит в том, чтобы отбирать лучшие и более перспективные научные программы, оценивая их актуальность и вероятность успешного выполнения наряду с другими предложенными проектами.

## Наблюдения в обычном и удаленном режимах

Если заявка принята, наблюдения проводятся как в удаленном режиме, так и в обычном (сам астроном ездит на обсерваторию) в зависимости от сложности задачи. В настоящее время примерно 60—70 % от общего количества наблюдений проводится в удаленном режиме. Для работы в данном режиме наблюдательная программа составляется заранее, за несколько недель, в виде специального запроса со всеми настройками приборов и нужной информацией для персонала обсерватории. Этот заказ на наблюдения ставится в очередь в соответствии с установленным комитетом приоритетом (высокий, средний или низкий) и исполняется, когда условия (погода, часовой угол, отсутствие других программ с более высокими приоритетами) позволяют. Сами наблюдения проводятся паранальскими астрономами без участия заявителя, наблюдательные данные потом можно скачать в необработанном виде из архива через Интернет. Для некоторых инструментов ESO посылает автоматически обработанные данные заявителю проекта к концу наблюдательного полугодия.

При обычном режиме наблюдатель сам ездит на Параналь. К данному режиму относятся сложные или нестандартные наблюдения или те, риск неправильного выполнения которых ESO не хочет брать на себя. Добираться до обсерватории довольно долго: для работающего в Европе астронома, например, поездка начинается с пятнадцатичасового рейса через шесть часовых поясов до столицы Чили Сантьяго. Там ему предоставляется ночлег в доме для гостей ESO, блюда местной кухни, приготовленные профессиональным поваром, и, по обычаю, чилийский национальный напиток «писко сауер». Другими словами, организация ESO делает все, чтобы после тяжелой поездки и перед долгими ночами за телескопом астрономам было максимально комфортно.

Проведя сутки-двое в Сантьяго, астроном продолжает свой путь до обсерватории, которая находится в 1000 км на север от чилийской столицы. По правилам ESO астрономам положено приезжать на обсерваторию за день-два до начала наблюдений. Как и в Сантьяго, условия быта для астрономов и инженеров на горе очень благоприятные. На высоте 2000 м, в 3 км от пика Параналь, расположена удостоенная наград гостиница ESO. Здание встроено прямо в землю. Это частично замкнутая экологическая система, чтобы длительно находящиеся на горе люди не страдали из-за экстремальных

погодных условий (относительная влажность здесь обычно составляет 5—15 %), которые совсем непригодны для жизни (так, в 2003 г. был проведен эксперимент, в рамках которого искали следы жизни в почве пустыни Атакама с использованием примененных на спускаемых аппаратах «Викинг» методов. Следов жизни на основе ДНК найдено не было [6]).

Во время наблюдений астроном работает в общем зале управления, в котором располагаются все терминалы, оборудование и персонал для управления телескопами UT, VLTI, VST и VISTA (последние два телескопа также находятся на Паранале, но не относятся к VLT). Телескопом управляют как минимум двое — инженер, который обеспечивает нормальную работу телескопа и научных приборов и в то же время старается защитить дорогостоящее оборудование от небрежного обращения, и обсерваторский астроном, который выполняет указания и просьбы приезжего наблюдателя. Внеобсерваторским людям (т. е. нам) самим управлять телескопами строго запрещено. После наблюдений полученный материал записывается на носители или передается по Интернету, а астроном начинает долгий путь обратно, хотя некоторые посвящают недельку-две отдыху в Чили.

### **Архив наблюдательных данных ESO**

Все данные, полученные на телескопах VLT (и на всех телескопах ESO), сохраняются в архиве, который доступен в Интернете по адресу: <http://archive.eso.org>. Доступ к наблюдательным данным того или иного проекта представлен исключительно заявителю программы в течение одного года после наблюдений. После этого срока данные выходят в открытый доступ и их может скачать каждый желающий (не только астрономы из стран ESO). Общий размер материалов наблюдений в архиве в данный момент составляет примерно 65 Тб и увеличивается на 15 Тб в год.

Открытый доступ к наблюдательным данным дает возможность не только проверять уже проделанную работу, но и использовать эти данные в своих собственных проектах. Например, как и на всех обсерваториях, очень часто получается так, что данные были получены, но не анализировались или что старые наблюдения можно использовать в новом качестве. Такой подход относится к идее так называемой виртуальной обсерватории, о которой можно более подробно прочитать в трудах 37-й зимней школы [7].

## Примеры работы российских астрономов на VLT

Несмотря на то что Россия пока не является членом ESO, несколько российских астрономов уже работают с полученным на VLT наблюдательным материалом. Здесь приведена небольшая выборка из трех работ, написанных российскими астрономами на основе данных из VLT.

- Т. А. Рябчикова и др. представили работу в 2007 г. В ней исследуются вертикальные моды колебаний быстроколеблющихся звезд типа Ар (гоАр) [8]. Используются 958 спектров в оптическом диапазоне, полученных на спектрографе UVES, для выборки — восемь звезд типа гоАр. Посредством исследования кратковременных вариаций большого набора различных спектральных линий авторам удалось раскрыть вертикальную структуру мод колебаний и химической стратификации в звездных атмосферах.
- В 2010 г. в своей магистерской диссертации М. С. Храмцова изучала поглощающие системы на красном смещении  $z \sim 0.4$  по лучу зрения квазаров [9]. В данной работе использован прибор VIMOS в режиме интегрального поля, что позволяет получить 1 600 спектров в поле зрения  $54 \times 54''$ . Исследуется характер поглощающего вещества, и в некоторых случаях эти системы отождествляются с образующими звезды галактиками.
- В работе 2011 г., которая заняла первое место на студенческом конкурсе 40-й зимней школы, Т. М. Ситнова и Л. И. Машонкина проанализировали вклад  $r$ - («быстрого») и  $s$ - («медленного») процессов захвата нейтронов в химический состав звезды гало HD 29907 [10]. В работе используются спектры из архива, снятые на спектрографе UVES. Тщательный анализ обилия тяжелых элементов позволил сделать заключение об условиях межзвездной среды во время формирования звезды и о ролях различных механизмов в нуклеосинтезе.

## Россия, ESO и вы

В последнее время разговоры о возможном вступлении России в ESO идут на высоком уровне (см., например, [11]). Хотя такие обсуждения выходят за рамки данной лекции, важно отметить, что членство в ESO дало бы российским астрономам всех уровней огромную

выгоду. Не исключено, например, что первокурсники этой же зимней школы смогут уже ко времени своей магистерской диссертации или дипломной работы написать собственную заявку на наблюдения в ESO, провести наблюдения в Чили и опубликовать результаты в журнале *Astronomy and Astrophysics* без каких-либо специальных грантов. Однако для членства в ESO на таких прекрасных условиях России придется платить — примерно 10—15 млн евро (400—600 млн российских рублей) в год.

Тем не менее и сейчас мотивированному студенту ничего не мешает связаться со своими коллегами из других стран и подать заявку на наблюдения в ESO. Опыт свидетельствует о том, что европейские институты приветствуют такой подход и очень часто готовы поддерживать работу с иностранными коллегами за счет своих средств. И это значит, что перспективы для сотрудничества уже есть.

## Заключение

Телескопы VLT на Паранальской обсерватории в Чили являются ключевым инструментом Европейской южной обсерватории. Широкий набор наблюдательных приборов в диапазоне от 300 нм до 25 мкм обеспечивает большое количество решаемых задач, начиная с исследований объектов в нашей Солнечной системе и заканчивая дальними галактиками и квазарами. Поддержка со стороны ESO делает весь процесс максимально удобным и доступным для астрономов, способствуя таким образом научному прогрессу.

Конкурс для получения наблюдательного времени на телескопах VLT довольно большой, и время преимущественно дается астрономам из стран — членов ESO. Однако доступ к архиву наблюдательных данных ESO предоставляется всем астрономам мира и является бесценным ресурсом, особенно для тех, кому тяжело или невозможно получить время на подобных телескопах. Поэтому, несмотря на то, что Россия не является членом ESO, возможность использовать ее наблюдения все равно есть, и этим нужно воспользоваться.



Пока невелико количество работ, выполняемых астрономами из России с наблюдательным материалом из VLT, но несколько групп работают с ресурсами паранальской обсерватории уже с момента ее открытия. В список публикуемых статей входят работы как студентов и аспирантов, так и сотрудников научных институтов. И в конечном итоге совершенно справедливо ожидать, что количество их будет только расти.

## Список библиографических ссылок

1. Annual Report 2010, Ed. by T. de Zeeuw. — Garching, Germany : European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere, 2010. <http://www.eso.org/public/archives/annualreports/pdf/ann-report2010.pdf>.
2. *Riess A. G., Strolger L.-G., Tonry J. et al.* Type Ia Supernova Discoveries at  $z > 1$  from the Hubble Space Telescope: Evidence for Past Deceleration and Constraints on Dark Energy Evolution // *Astrophys. J.* — 2004. — Vol. 607. — P. 665—687.
3. *Schödel R., Ott T., Genzel R. et al.* A star in a 15.2-year orbit around the supermassive black hole at the centre of the Milky Way // *Nature.* — 2002. — Vol. 419. — P. 694—696.
4. *Pettini M., Shapley A. E., Steidel C. C. et al.* The Rest-Frame Optical Spectra of Lyman Break Galaxies: Star Formation, Extinction, Abundances, and Kinematics // *Astrophys. J.* — 2001. — Vol. 554. — P. 981—1000.
5. *Cayrel R., Depagne E., Spite M. et al.* First stars V-Abundance patterns from C to Zn and supernova yields in the early Galaxy // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 416. — P. 1117—1138.
6. *Navarro-González R., Rainey F. A., Molina P. et al.* Mars-Like Soils in the Atacama Desert, Chile, and the Dry Limit of Microbial Life // *Science.* — 2003. — Vol. 302, № 5647. — P. 1018—1021. <http://www.sciencemag.org/content/302/5647/1018.full.pdf>.
7. *Малков О. Ю.* Международная виртуальная обсерватория // *Физика космоса : Тр. 37-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 28 янв. — 1 февр. 2008 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2008. — С. 90—97.*
8. *Ryabchikova T., Sachkov M., Kochukhov O., Lyashko D.* Pulsation tomography of rapidly oscillating Ap stars. Resolving the third dimension in peculiar pulsating stellar atmospheres // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 473. — P. 907—922.

9. *Храмцова М. С.* Изучение систем, поглощающих в линиях Mg II, для объектов с красным смещением  $z \sim 0.4$  : магистер. дис. / Урал. гос. ун-т. — Екатеринбург, 2010. — 43 с.
10. *Ситнова Т. М., Машонкина Л. И.* Вклад  $r$ - и  $s$ - процессов в содержание тяжелых элементов у звезды гало HD 29907 // Письма в Астрон. журн. — 2011. — Vol. 37. — P. 525—544.
11. России необходимо присоединиться к проекту европейской обсерватории, чтобы сохранить свою астрофизику. — Президент РАН. — 2011. — Москва, 13 сент., ИТАР-ТАСС. <http://www.itar-tass.com/c11/224652.html>.

## МЕЖЗВЕЗДНЫЕ ЛЬДЫ

Наблюдения в инфракрасном диапазоне, выполненные на наземных и космических телескопах (ISO, Spitzer) позволили установить, что основными составляющими межзвездного льда являются молекулы воды, CO, CO<sub>2</sub> и аммиака, а также незначительные примеси более сложных соединений. Обнаружены вариации состава и структуры льда вокруг протозвездных объектов, находящихся на разных стадиях эволюции. Лабораторные исследования позволяют получить важную информацию о структуре льдов и кинетике протекающих в них химических реакций. Численное моделирование льдов, основанное на теоретических исследованиях и лабораторных данных, дает возможность качественно объяснить наблюдательные данные, а также предсказать дальнейшую эволюцию льдов и их роль в формировании сложных органических молекул — возможных предвестников жизни во Вселенной.

Infrared observations made with ground-based and space (ISO, Spitzer) telescopes reveal the main ice constituents in the interstellar medium to be water, CO, CO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> with small additions of more complex species. Variations of ice structure and composition between protostellar objects of different evolutionary stages have also been discovered. Laboratory studies of ice analogs give important information about THE structure of ices and the kinetics of ice chemistry. Numerical modeling of ices based on laboratory data and theoretical predictions provides A qualitative explanation of observations, and predictions of further ice evolution and their role in the formation of complex prebiotic species — the possible precursors of life.

Звезды и планетные системы формируются в процессе гравитационного сжатия гигантских газопылевых облаков; 98 % массы этих облаков приходится на простейшие химические элементы — водород и гелий, оставшиеся 2 % — на все остальные элементы таблицы Менделеева, которые астрономы называют тяжелыми. Эти два процента очень важны для нас, жителей Земли, поскольку именно из них сформировалась наша планета и мы сами. Одна из важнейших задач астрономии — проследить эволюцию тяжелых элементов в процессе

образования звезд и планет, понять, каким образом из отдельных атомов, рассеянных в космосе, формируются планеты земного типа, а на них — жизнь.

В настоящее время мы знаем, что атомы тяжелых элементов рождаются в термоядерных и ядерных реакциях в недрах звезд промежуточных и больших масс, которые затем выбрасывают вещество, обогащенное тяжелыми элементами, в межзвездную среду (МЗС). Из части этого вещества вновь формируются звезды, в то время как другая часть остается в МЗС в газообразной форме. В атмосферах некоторых звезд происходит формирование кластеров молекул тяжелых элементов — микроскопических межзвездных пылевых частиц размером  $\sim 10^{-5}$  см, которые затем также попадают в межзвездную среду. В результате в настоящее время области образования звезд состоят из смеси газа, обогащенного тяжелыми элементами, и пылевых частиц. Между атомами элементов происходят химические реакции, приводящие к образованию молекул, между которыми, в свою очередь, вновь происходят химические реакции. Взаимодействие молекул в газе и частиц пыли приводит к тому, что последние постепенно покрываются льдом, в состав которого входят молекулы, широко распространенные на Земле. Покрытые межзвездным льдом пылевые частицы способны слипаться между собой, образуя все более крупные объекты, вплоть до комет, астероидов и планет. Таким образом, межзвездные льды играют заметную роль в образовании планет земного типа.

## Наблюдения льдов

Льды способны поглощать фотоны с длиной волны 1—100 мкм. Это позволяет наблюдать их в инфракрасном (ИК) диапазоне спектра при условии, что льды подсвечиваются излучением звезд. К сожалению, возможность инфракрасных наблюдений с поверхности Земли серьезно ограничена прозрачностью атмосферы. В ИК-диапазоне есть лишь несколько окон прозрачности на длинах волн 3.0—4.0, 4.6—5.0, 7.5—14.5, 17—25, 28—40 и 330—370 мкм, в которые попадают полосы поглощения не всех компонентов межзвездного льда.

Первые наблюдения межзвездного льда были проведены в 1973 г. в направлении области массивного звездообразования Orion BN/KL [1]. Исследователям удалось обнаружить полосу поглощения на 10 мкм, соответствующую силикатной пыли, и полосу

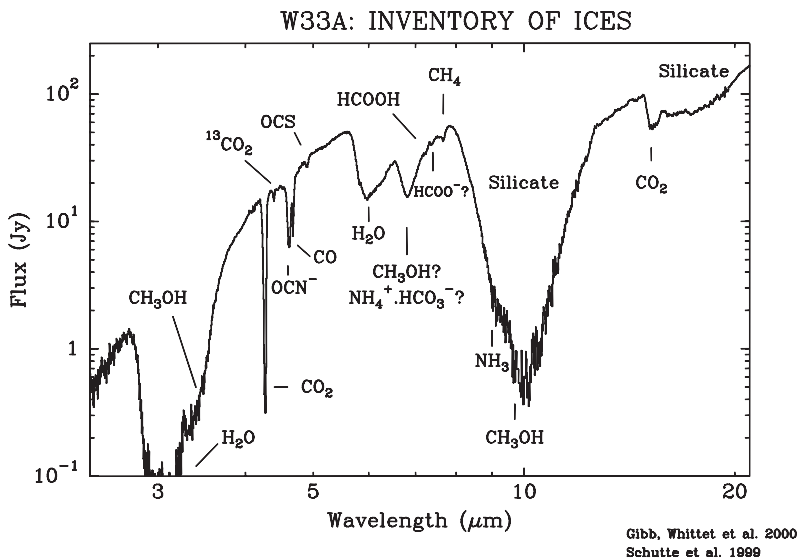


Рис. 1. Инфракрасный спектр межзвездного льда в направлении на источник W33A, полученный космической обсерваторией ISO. Видны полосы поглощения, соответствующие основным составляющим льда (рисунок из [2])

поглощения на 3.1 мкм, соответствующую водяному льду (рис. 1). В 1970—1980-е гг. исследования межзвездных льдов выполнялись, в частности, на воздушной обсерватории Койпера (Kuiper Airborne Observatory — KAO) — самолете, имевшем на борту телескоп с диаметром главного зеркала 91.5 см. Самолет мог подниматься на высоту до 14 км, что позволяло вести наблюдения на длинах волн около 4.5 и 8 мкм, недоступных с поверхности Земли из-за поглощения, вызванного водяным паром в нижних слоях атмосферы. В 1984 г. в направлении на источник W33A была обнаружена полоса поглощения на 4.6 мкм, соответствующая льду из монооксида углерода CO [3]. В 1987 г. при помощи наземного телескопа была обнаружена новая составляющая межзвездного льда — метанол  $\text{CH}_3\text{OH}$  [4] (полоса поглощения на 3.53 мкм). В 1991 г., также при помощи наземного телескопа, в составе межзвездного льда удалось обнаружить метан  $\text{CH}_4$  [5]. По косвенным признакам (различие формы наблюдаемых и

модельных полос поглощения) было установлено, что межзвездные льды должны содержать аммиак  $\text{NH}_3$  и формальдегид  $\text{H}_2\text{CO}$ . Стало ясно, что в составе межзвездных льдов, по крайней мере в областях образования массивных звезд, доминирует вода. Доля  $\text{CO}$ -льда не превышает 30 % от водяного, количество аммиака составляет около 10 %, а доля метанола и формальдегида не превышает нескольких процентов.

Несмотря на достигнутый за 1970—1980-е гг. прогресс, знания о межзвездных льдах оставались весьма ограниченными. Во-первых, поглощение в атмосфере Земли не позволяло проводить наблюдения в некоторых важных участках ИК-диапазона даже с помощью телескопов, установленных на самолетах. Во-вторых, чувствительность имевшихся к началу 1990-х гг. телескопов, а также разрешение установленных на них спектрографов позволяли наблюдать льды в направлении лишь нескольких наиболее ярких ИК-источников: Orion BN/KL, W33A, Elias 16 и нескольких других. Столь малого количества объектов было недостаточно для сбора значимой статистики о составе льда. В частности, оставалось неясным, насколько отличаются друг от друга льды вокруг маломассивных и массивных протозвезд, а также как меняются льды в процессе эволюции протозвезды.

Качественный скачок в изучении межзвездных льдов произошел в 1995 г. с запуском Инфракрасной космической обсерватории ISO. Аппаратура, установленная на ISO, впервые позволила получить инфракрасные спектры в диапазоне длин волн 2.5—240 мкм без «слепых пятен», обусловленных поглощением в атмосфере Земли. Это позволило буквально в первые месяцы после запуска обнаружить полосы поглощения последней из молекул — основных компонентов межзвездного льда —  $\text{CO}_2$  на 4.27 и 15.2 мкм [6]. Доля  $\text{CO}_2$  в составе льда оказалась сопоставимой с долей монооксида углерода  $\text{CO}$ . Высокое качество спектров, полученных на ISO, позволило провести детальный анализ формы полос поглощения молекул — компонентов межзвездного льда. Было установлено, что  $\text{CO}_2$ -лед, как правило, хорошо перемешан с водяным льдом, в то время как  $\text{CO}$ -лед — нет [2]. Заметные вариации профиля полосы поглощения  $\text{CO}_2$  на 15 мкм в направлении на различные источники, а также признаки наличия во льдах вокруг протозвезд иона  $\text{OCN}^-$ , находящихся на более поздних стадиях эволюции, явились убедительными доказательствами эволюции межзвездных льдов. Постепенный нагрев газопылевого облака формирующейся звездой приводит к увеличению в них

**Типичный состав межзвездного льда в областях образования массивных и маломассивных звезд (в массовых долях)** (составлено на основе данных работы [9])

Молекула	Протозвезды малой массы	Массивные протозвезды
H <sub>2</sub> O	100	100
CO	29	13
CO <sub>2</sub>	29	13
CH <sub>3</sub> OH	3	4
NH <sub>3</sub>	5	5
CH <sub>4</sub>	5	2
OCN <sup>-</sup>	0.3	0.6

доли CO<sub>2</sub>, а также более сложных органических молекул. Спектры, полученные на ISO, содержат указания на то, что во льдах имеется небольшое количество таких молекул, как HCOOH, CH<sub>3</sub>CHO и некоторых других [7, 8]. Кроме того, меняется структура льда. Происходит сегрегация, приводящая, в частности, к разделению смеси воды и CO<sub>2</sub> на два перемешанных компонента.

Всего на ISO были получены детальные спектры межзвездных льдов в направлении более чем на 30 источников. Большая часть из них — массивные протозвезды. Малые размеры главного зеркала ISO (60 см) не обеспечивали чувствительность, достаточную для изучения льдов в областях образования маломассивных звезд.

В 2003 г. состоялся запуск космического инфракрасного телескопа Spitzer (Спитцер). Телескоп оснащен зеркалом диаметром 85 см и намного более чувствительными, чем у ISO, приемниками излучения. Это позволило впервые провести обзор состава межзвездных льдов в направлении области образования маломассивных звезд, подобных Солнцу. Поскольку спектрограф Спитцера работает только в диапазоне длин волн 5—30 мкм, данные с космического телескопа дополняются наблюдениями с наземных телескопов Keck, расположенных в северном полушарии, и VLT, расположенных в южном полушарии Земли. Всего по программе исследования льдов на Спитцере были получены спектры ~50 областей образования массивных звезд [9]. Статистический анализ полученных данных показал, что в целом льды в областях образования массивных и маломассивных звезд похожи. Однако имеются и систематические различия в составе льдов [9]. Доля водяного льда по сравнению с другими компонентами выше вокруг массивных звезд (см. таблицу). В то же время состав льдов относительно слабо меняется от объекта к объекту, если эти объекты одного типа.

Обобщение всей совокупности данных, полученных в предыдущие десятилетия, позволяет сформулировать картину эволюции межзвездных льдов при образовании звезд и планетных систем в процессе коллапса протозвездного облака (рис. 2). Ледяные мантии межзвездных пылевых частиц начинают формироваться на самой ранней стадии звездообразования, как только будущее протозвездное облако сгущается из диффузной межзвездной среды. На первом этапе на пылевых частицах происходит одновременное формирование водяного льда, а также льда из молекул  $\text{CO}_2$  и  $\text{NH}_3$ . Эти льды формируются благодаря химическим реакциям на поверхности пылевых частиц из «сырья» — атомов водорода, углерода, кислорода и азота, «вымерзающих» из газа на пыль. Причиной вымерзания является постепенное охлаждение дозвездного облака по сравнению с диффузной средой. В процессе сжатия облако становится холодным ( $\sim 10$  K) и непрозрачным для межзвездного ультрафиолетового поля. В его газе начинают активно формироваться молекулы CO. При низкой температуре они быстро «вымерзают» на пылевые частицы, формируя CO-лед, и перемешанный с водяным льдом. При дальнейшей эволюции облака в его центре образуется протозвезда, начинающая постепенно нагревать окружающие газ и пыль. Температура пылевых частиц медленно растет, вызывая сегрегацию компонентов льда. На лед также действует ультрафиолетовое излучение молодой звезды. При этом, по-видимому, во льдах формируется некоторое количество сложных органических молекул. Заманчиво было бы предположить, что эти молекулы в дальнейшем попадают в состав комет и на поверхность планет, которые формируются вокруг звезды, и впоследствии приводят к зарождению жизни. Однако в настоящее время наблюдательных данных об эволюции льдов в молодых планетных системах немного. В ближайшее время прогресс в изучении межзвездных льдов, по-видимому, будет связан с изучением влияния льдов на химический состав газа, в том числе в протопланетных дисках. Недавно начавший работу радиоинтерферометр ALMA обещает сыграть в этом процессе важную роль.

### **Физические процессы на поверхности: формирование льдов**

Перейдем к рассмотрению физических процессов, приводящих к формированию ледяных мантий на частицах межзвездной пыли (рис. 3). Основная часть льдов формируется в молекулярных обла-



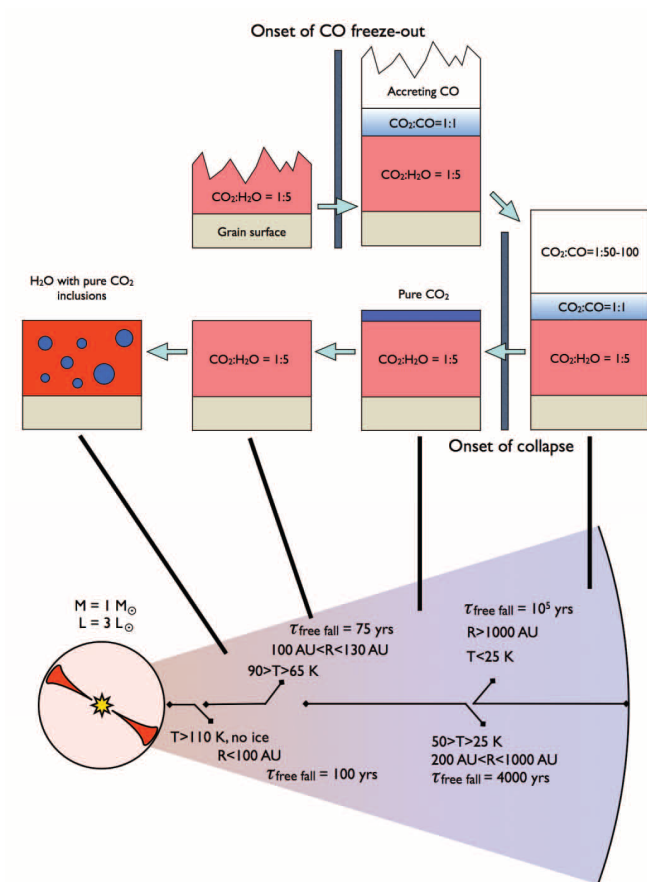


Рис. 2. Эволюционная последовательность межзвездных льдов согласно современным представлениям (рисунок из [10])

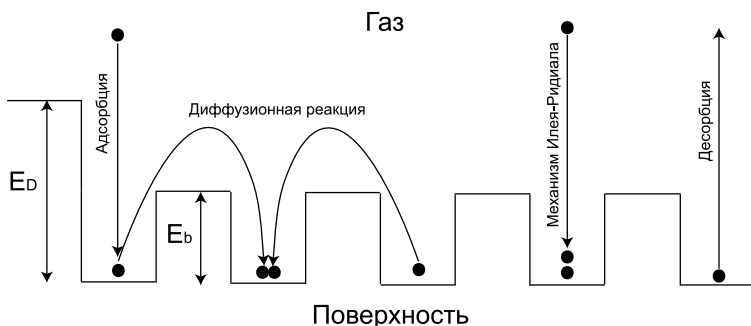


Рис. 3. Основные физические процессы, играющие важную роль в образовании межзвездных льдов. Потенциал поверхности показан схематически как одномерный прямоугольный периодический

ках, средняя плотность которых составляет порядка  $10^3$ – $10^4$  см $^{-3}$ , а температура варьируется от 10 до 30 К. Это экстремальные условия по сравнению с привычными для человека. Например, плотность земной атмосферы на уровне моря составляет порядка  $10^{19}$  см $^{-3}$ , а «комнатная температура» приблизительно равна 300 К. В этих условиях эффективны преимущественно двухчастичные экзотермические реакции (т. е. реакции между не более чем двумя атомами или молекулами, протекающие с выделением тепла) [11].

При низких температурах порядка 10 К практически любой атом или молекула, столкнувшись с поверхностью пылевой частицы, имеют высокие шансы «прилипнуть» к ней (исключение составляют атомы гелия и молекулы водорода). Если при прилипании к поверхности (адсорбции) происходит формирование химической связи между адсорбировавшей молекулой и молекулой пылинки, произошедшее называют *хемисорбцией*. Если же химическая связь не сформировалась и адсорбировавшая молекула удерживается на поверхности ван-дер-ваальсовскими силами, говорят о *физисорбции*. Хемисорбированные молекулы удерживаются на поверхности гораздо сильнее, чем физисорбированные: энергия связи при хемисорбции, как правило, превышает 1 эВ ( $10^4$  К), в то время как при физисорбции энергии связи варьируются в пределах 0.1–0.3 эВ (1000–3000 К). Адсорбция молекул происходит, как правило, не на произвольное место на поверхности, а на определенные участки, где форма поверхностного потенциала наиболее благоприятна (в потенциальную яму). Количество таких мест на средней межзвездной пылинке

составляет порядка  $10^6$  [12]. Иначе говоря, «в один слой» на поверхности пылинки могут разместиться порядка миллиона атомов или молекул. Количество столкновений молекул газа с пылевой частицей в единицу времени может быть вычислено по формуле

$$r_{\text{acc}} = \pi a^2 \bar{v} n_{\text{mol}}, \quad (1)$$

где  $a$  — радиус пылинки (см);  $n_{\text{mol}}$  — концентрация молекул в единице объема ( $\text{см}^{-3}$ );  $\bar{v}$  — средняя скорость движения молекул данного типа в газе (см/с), получаемая, например, из максвелловского распределения молекул по скоростям. Следовательно, при температуре 10 К, плотности газа  $10^4 \text{ см}^{-3}$  и среднем размере пылинки  $10^{-5}$  см самая распространенная в космосе молекула, способная адсорбировать — СО, сталкивается с пылевой частицей приблизительно один раз в четыре дня. Иначе говоря, пылевая частица покрывается слоем мономолекулярного льда примерно за 10 000 лет, если все адсорбированные молекулы остаются на пылинке бесконечно долго. При достаточно низких температурах ( $\leq 20$  К) большая часть молекул из межзвездного газа адсорбирует на поверхность пылевых частиц, формируя первую фазу межзвездного льда. Адсорбция молекул при низких температурах подтверждается наблюдательно: радионаблюдения молекулярных линий показывают отсутствие молекул в центрах холодных дозвездных ядер.

Что может помешать адсорбированной молекуле находиться на поверхности бесконечно долго? Адсорбированная молекула не лежит на поверхности неподвижно. В действительности она колеблется вблизи поверхности с частотой  $\nu_0$  порядка  $10^{12}$  Гц. Каждое такое колебание может рассматриваться как попытка разорвать связь между молекулой и поверхностью. Если связь будет разорвана, молекула может покинуть поверхность пылинки и уйти обратно в газ — *десорбировать*. Вероятность отрыва равна  $\exp(-E_D/kT)$ , где  $T$  — температура пылинки;  $k$  — постоянная Больцмана;  $E_D$  — энергия связи (или энергия десорбции). Тогда средняя частота ( $\text{с}^{-1}$ ), с которой молекулы будут покидать пылевую частицу, равна (уравнение Поляни—Вигнера):

$$r_{\text{des}} = \nu_0 \theta^n e^{-E_D/kT}, \quad (2)$$

где  $\theta$  — количество молекул на поверхности пылинки; показатель степени  $n$  — порядок десорбции. Это явление называется *тепловой десорбцией*. Если лед толстый, испарение идет только с его поверхности. В этом случае принято говорить о десорбции нулевого порядка

( $n = 0$ ), скорость которой не зависит от общего числа молекул на пылинке. Если же лед тонкий (1–2 слоя), скорость десорбции будет зависеть от общего числа молекул. В этом случае речь идет о десорбции первого порядка ( $n = 1$ ). Энергии десорбции  $E_D$  разные для различных атомов и молекул. Они зависят и от свойств поверхности. Их точное определение — непростая задача, решаемая, как правило, с помощью лабораторных экспериментов (см. следующий раздел). Например, согласно последним измерениям, энергия десорбции атома водорода с поверхности силикатной пылинки равна 0.04 эВ, молекулы CO — 0.1 эВ, молекулы CO<sub>2</sub> — 0.22 эВ, а молекулы воды — 0.5 эВ. Критическая температура, при которой начинается активная десорбция, для CO равна приблизительно 20 К, для CO<sub>2</sub> — 40 К, а для воды — около 100 К.

Частным случаем тепловой десорбции можно считать десорбцию льдов, обусловленную столкновением пылинок с частицами космических лучей. Эти события приводят к кратковременному нагреву пылевой частицы до температуры порядка 100 К и десорбции части адсорбированных молекул.

Вторым важным в межзвездной среде типом десорбции является *фотодесорбция*. Сталкивающиеся с пылевыми частицами фотоны межзвездного ультрафиолетового поля с длиной волны  $> 912 \text{ \AA}$  способны разрывать связи между адсорбированными молекулами и поверхностью пылинки. Данный тип десорбции, в частности, позволяет объяснить такие наблюдательные факты, как наличие молекул CO в газе в объектах с температурой ниже 20 К. Скорость фотодесорбции определяется как

$$r_{\text{UVdes}} = K I_{\text{UV}} Y e^{-A_{\text{UV}}}, \quad (3)$$

где  $I_{\text{UV}}$  — интенсивность ультрафиолетового поля;  $Y$  — выход десорбированных молекул на один фотон;  $A_{\text{UV}}$  — экстинкция для ультрафиолетовой части спектра;  $K$  — коэффициент пропорциональности. Величина выхода  $Y$  известна плохо. Ранние оценки колебались вблизи значения  $10^{-5}$  молекул/фотон. Недавние исследования дают более высокие оценки  $Y$  — порядка  $10^{-3}$  молекул/фотон.

Колеблющаяся вблизи поверхности адсорбированная молекула может не только десорбировать, но также с большей вероятностью «перескочить» в соседнюю потенциальную яму на поверхности. Это обусловлено тем, что высота барьеров между соседними потенциальными ямами на поверхности меньше, чем энергия связи молекулы с поверхностью. Отношение величины барьера диффузии к энергии десорбции  $E_b/E_D$  обычно оценивается в пределах  $0.3 \div 0.8$ . Возмож-

ность таких «перескоков» приводит к тому, что адсорбированные молекулы *диффундируют* по поверхности, причем траектория диффундирующей молекулы хорошо описывается как двумерное случайное блуждание. Поскольку одновременно блуждает больше одной молекулы, периодически две молекулы попадают одновременно в одну и ту же потенциальную яму, где могут прореагировать друг с другом. Описанный механизм химических реакций на поверхности называется диффузионным или *механизмом Ленгмюра—Хиншельвуда*. Поверхность пылевой частицы выступает третьим агентом в реакции, отводя избыточную энергию и стабилизируя продукты реакции. Это делает возможным протекание на поверхности таких химических реакций, которые невозможны в разреженном межзвездном газе. В частности, молекула водорода  $H_2$ , составляющая основу молекулярных облаков, формируется в основном на пыли. Кроме того, на пыли происходит формирование сложных углеводородов, например, метанола  $CH_3OH$ , метилформиата  $HCOOCH_3$  и ряда других.

Достаточно легко оценить скорость диффузионной поверхностной реакции. Частота «прыжков» молекулы из одной потенциальной ямы в другую определяется по аналогии со скоростью десорбции (2):

$$r_{\text{hop}} = \nu_0 e^{-E_b/kT}. \quad (4)$$

Если общее количество потенциальных ям на поверхности пылинки  $N_s$ , то среднее время, необходимое молекуле для «обхода» всех ям, близко к

$$t_{\text{diff}} = N_s / r_{\text{hop}}. \quad (5)$$

Тогда средняя скорость поверхностной реакции между молекулами  $A$  и  $B$ , не имеющей барьера активации, в расчете на одну пылинку будет описываться выражением

$$r_{AB} = (1/t_{\text{diff}}^A + 1/t_{\text{diff}}^B) N_A N_B, \quad (6)$$

где  $N_A$  и  $N_B$  — количество молекул  $A$  и  $B$  на поверхности пылевой частицы. Введенная выше частота прыжков (4) подразумевает прыжки вследствие тепловых колебаний атомов и молекул. Однако для самых легких из них — адсорбированных атомов и молекул водорода — возможен и другой механизм попадания из одной потенциальной ямы в другую. Этот механизм — квантовое туннелирование

сквозь разделяющий ямы потенциальный барьер. Не вдаваясь в подробности, скажем лишь, что частота прыжков  $r_{\text{hop}}$ , обусловленная квантовым туннелированием, значительно выше частоты прыжков вследствие тепловых колебаний.

Механизм Ленгмюра—Хиншельвуда в настоящее время считается основным механизмом реакций на поверхности космических пылинок в молекулярных облаках. Упомянем также еще один возможный механизм, который, по-видимому, не играет значительной роли при формировании льдов, однако может быть важен на стадии формирования молекулярного облака из диффузного — *механизм Илея—Ридиала*. В диффузном облаке температура пыли высока, что приводит к быстрой десорбции адсорбируемых атомов и молекул. Исключение составляют лишь атомы или молекулы, прочно связанные с поверхностью пылевых частиц посредством хемисорбции. Хемисорбированные молекулы не обладают подвижностью, следовательно, диффузионный механизм Ленгмюра—Хиншельвуда не работает. Однако возможен другой механизм: «прямое попадание» при адсорбции молекулы из газа в молекулу, уже находящуюся на пыли. Скорость химических реакций, происходящих посредством механизма Илея—Ридиала, описывается выражением

$$r_{AB} = r_{\text{acc}}^A P(B) + r_{\text{acc}}^B P(A), \quad (7)$$

где  $r_{\text{acc}}^A$  и  $r_{\text{acc}}^B$  — скорости аккреции молекул  $A$  и  $B$ ;  $P(A)$  и  $P(B)$  — вероятности «прямого попадания» в молекулы  $A$  и  $B$ , хемисорбированные на поверхности. Очевидно, ничто не мешает этому механизму реализовываться и в молекулярных облаках. Дело, однако, в том, что скорость диффузионных реакций, как правило, значительно выше скорости аккреции молекул из газа. Следовательно, в условиях, когда эффективен диффузионный механизм Ленгмюра—Хиншельвуда, механизм Илея—Ридиала не играет значительной роли [13].

Основные химические реакции, происходящие на поверхности пылевых частиц, таковы. Во-первых, это фундаментальная реакция образования молекулярного водорода  $\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2$ . Во-вторых, это реакции добавления атомов водорода, приводящие, в частности, к образованию метанола в цепочке  $\text{CO} \rightarrow \text{HCO} \rightarrow \text{H}_2\text{CO} \rightarrow \text{H}_3\text{CO} \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$  и аммиака в цепочке  $\text{N} \rightarrow \text{NH} \rightarrow \text{NH}_2 \rightarrow \text{NH}_3$ . Кроме того, отметим вероятную реакцию

образования молекулы  $\text{CO}_2$ :  $\text{OH} + \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$ , а также основную реакцию формирования воды:  $\text{H} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ . Напомним, что моноокись углерода  $\text{CO}$  в основном адсорбирует из газа, а не образуется на пыли.

Мы кратко рассмотрели основные процессы, определяющие эволюцию льдов на поверхности межзвездных пылевых частиц. Посмотрим теперь, как определяются числовые значения энергий десорбции молекул  $E_D$  и эффективности выхода молекул на фотон  $Y$ , столь важные для количественного описания рассмотренных процессов.

## Лабораторные исследования льдов

Глубокое понимание механизмов формирования межзвездного льда требует сочетания подходов ряда научных дисциплин: астрономии, физики и химии, включая экспериментальные методы. Для проведения экспериментов, направленных на объяснение формирования межзвездных льдов, требуются высокотехнологичные аппараты, в которых возможно воспроизведение условий межзвездной среды. Первым из таких условий является низкая плотность. Поэтому все эксперименты по изучению аналогов межзвездного льда проводятся в вакуумных камерах. Лучшие из существующих в настоящий момент камер способны создать разрежение порядка  $10^{-10}$  мбар, что соответствует плотности  $10^8$  частиц в кубическом сантиметре при 10 К. Как можно видеть, по меркам областей звездообразования это давление все еще весьма высоко, но в других научных дисциплинах его называют *сверхглубоким вакуумом*. Вторым условием реалистичности эксперимента является низкая температура. В настоящее время при помощи жидкого гелия удается охладить вакуумные камеры до 10–20 К, что сопоставимо с температурой в дозвездных ядрах.

Рассмотрим подробнее устройство экспериментальной камеры, используемой для изучения межзвездных льдов, на примере установки CRYOPAD, используемой в Лейденском университете в Нидерландах (рис. 4). Основа установки — вакуумная камера, в которой поддерживается сверхглубокий вакуум. В центре камеры закрепляется подложка, на которой непосредственно выращивается лед (sample). Подложка выполняется либо из химически инертного металла (золото), либо из материалов, подобных по свойствам межзвездной пылевой частице (графит, кремний). Под углом около 45 градусов к подложке расположены источники атомов или моле-

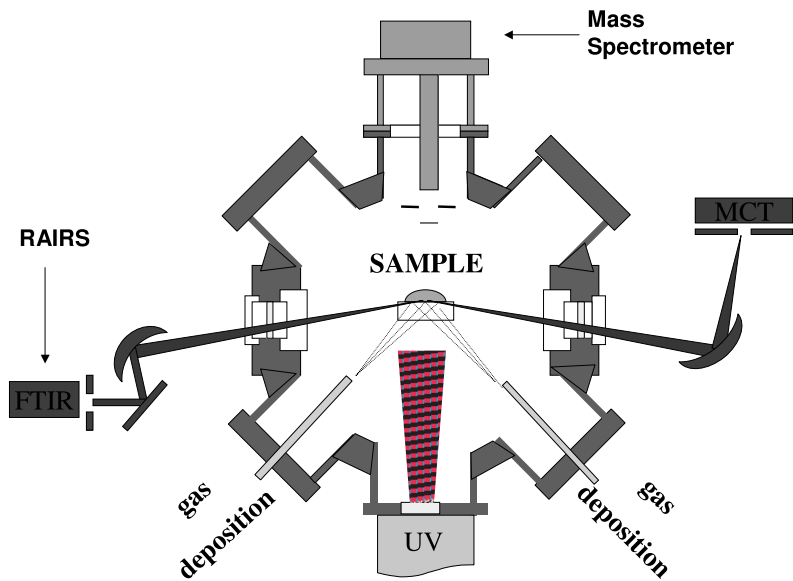


Рис. 4. Схема экспериментальной установки CRYOPAD (рисунок из [14])



кул (gas source), способные с высокой точностью подавать в камеру необходимое для эксперимента количество газа. Напротив подложки закреплена газоразрядная лампа, излучающая в ультрафиолетовой части спектра с известной интенсивностью. Важнейшее измерительное устройство, расположенное в камере, — масс-спектрометр (mass spectrometer), позволяющий определять, что и в каких количествах испаряется с подложки. Фурье-спектрометр (FTIR), расположенный слева от камеры, определяет состав и структуру льда, выращиваемого на подложке, посредством инфракрасной спектроскопии (RAIRS).

Как правило, эксперимент протекает по следующей схеме. Сначала подложка «облучается» потоками атомов или молекул из источников (gas source). Основная часть молекул адсорбирует на поверхность подложки, формируя первый мономолекулярный слой льда. Далее, в зависимости от целей эксперимента, поток новых молекул может быть или продолжен, или остановлен. Если цель эксперимента — изучить взаимодействие молекул адсорбата с подложкой, то поток останавливают и изучают поведение молекул, расположенных непосредственно на подложке. Если же задача эксперимента — исследовать поведение молекул в «толстом» льде, молекулам позволяют поступать на подложку, пока на ней не образуется лед толщиной в несколько (десятков) слоев. Современные экспериментальные установки позволяют выращивать лед с точностью до одного молекулярного слоя. Кроме того, изменяя химический состав потоков газа, можно выращивать лед заданной структуры, например состоящий только из молекул воды или только из молекул CO. Возможно также формирование льда со слоями разного химического состава: слои из CO поверх водяных слоев, вода поверх CO и т. д.

Одной из важнейших экспериментальных методик, которая позволяет, в частности, определить энергии десорбции молекул  $E_D$ , является методика *TPD* — *temperature programmed desorption*, т. е. *температурно программируемая десорбция*.

Суть методики проста: выращенный при низкой температуре лед постепенно нагревают и изучают десорбирующие из него молекулы. Температуру льда повышают линейно ( $T = T_0 + \beta t$ , где  $\beta = \frac{dT}{dt}$  — скорость нагрева), измеряя в процессе скорость десорбции  $r_{\text{des}}$ . Повторив эксперимент несколько раз, нагревая подложку каждый раз с разной скоростью  $\beta$ , можно определить энергию десорбции  $E_D$  и частоту колебаний  $\nu_0$  следующим образом. Скорость десорбции подчиняется уравнению Поляни—Вигнера (2). Если выращенный на подложке лед тонкий, то десорбция будет первого порядка. Харак-

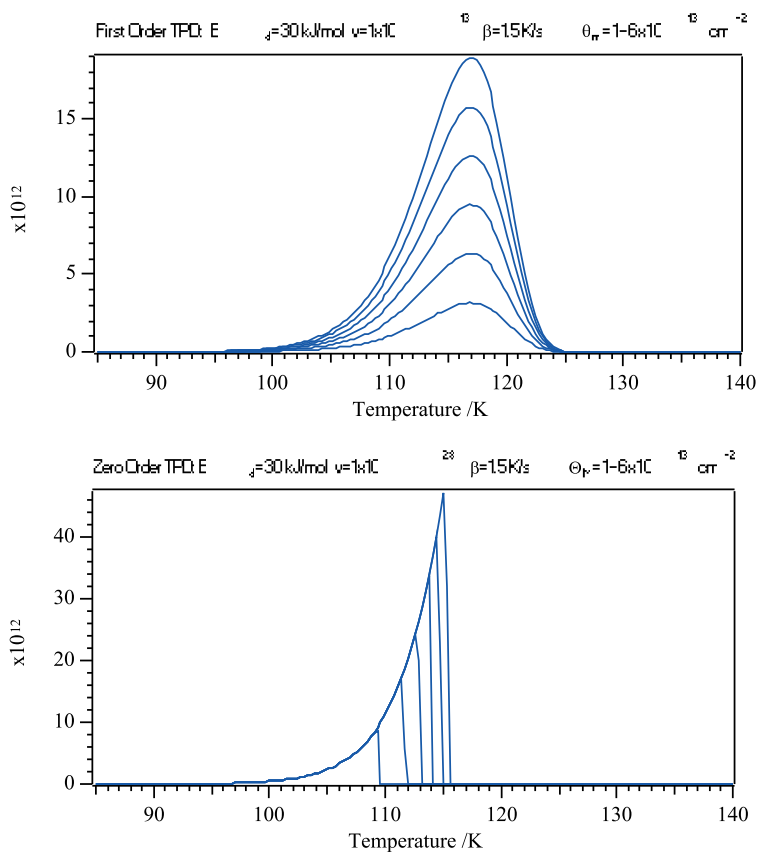


Рис. 5. Интенсивность испарения с поверхности в TPD-эксперименте при десорбции нулевого порядка (вверху) и десорбции первого порядка (внизу) (рисунок из <http://www.cem.msu.edu/~cem924sg/LectureNotes.html>)

терный вид графика скорости десорбции в зависимости от температуры в этом случае показан на рис. 5 вверху (несколько кривых соответствуют различному количеству молекул льда на подложке). Из графика видно, что скорость десорбции имеет максимум при некоторой температуре  $T_P$ , значение которой становится известно в ходе эксперимента. Эта температура удовлетворяет условию максимума скорости десорбции:

$$\frac{dr_{des}}{dT} = \frac{d}{dT} \frac{d\theta}{dt} = 0. \quad (8)$$

Имея в виду, что  $\beta = \frac{dT}{dt}$ , дифференцируем уравнение Поляни—Вигнера для десорбции первого порядка:

$$-\nu_0 e^{-E_D/kT} \left( \frac{d\theta}{dt} + \theta \beta \frac{E_D}{kT^2} \right) = 0. \quad (9)$$

После преобразований получаем следующее равенство:

$$\frac{\beta}{T_P^2} = \frac{\nu_0 k}{E_D} e^{-E_D/kT_P}. \quad (10)$$

Логарифмирование этого равенства приводит к соотношению

$$\ln \frac{\beta}{T_P^2} = \ln \frac{\nu_0 k}{E_D} - \frac{E_D}{k} \frac{1}{T_P}. \quad (11)$$

Это соотношение — уравнение прямой в координатах  $\left( \ln \frac{\beta}{T_P^2}, 1/T_P \right)$ . Поскольку эксперимент был проведен несколько раз при разных  $\beta$ , а  $T_P$  и  $k$  известны, можно построить эту прямую на графике. Ее пересечение с осью ординат дает значение  $\nu_0$ , а наклон — энергию десорбции молекулы  $E_D$ .

Если лед на подложке толстый, то при нагреве десорбция будет происходить только с его поверхности, т. е. будет иметь нулевой порядок. В этом случае максимума скорости десорбции не будет, она непрерывно растет до тех пор, пока лед на подложке не испарится полностью (рис. 5, нижняя панель). Таким образом, эксперимент по десорбции толстого льда не дает возможности определить энергию связи молекул и частоту их колебаний.

Схема эксперимента по определению выхода фотодесорбции  $Y$  также достаточно проста. Выращенный на подложке лед облучается ультрафиолетом известной интенсивности. Количество десорбировавших молекул фиксируется масс-спектрометром. Отношение количества десорбировавших молекул к числу облучивших лед фотонов и есть искомый выход  $Y$ .

## Моделирование межзвездных льдов

Несмотря на все усилия экспериментаторов, физические условия в лабораторных экспериментах весьма далеки от условий в межзвездной среде. Существенно более высокие плотность газа, интенсивность излучения УФ-ламп, с одной стороны, играют на руку экспериментаторам: время эксперимента оказывается существенно короче реального времени эволюции льда в межзвездной среде (невозможно осуществить эксперимент, длящийся миллион лет). С другой стороны, значительная разница условий в МЗС и в эксперименте ставит под вопрос применимость его результатов к объяснению происходящего в протозвездных объектах. В этой ситуации чрезвычайно полезным оказывается численное моделирование эволюции межзвездных льдов. Оно позволяет экстраполировать результаты экспериментов на недостижимые условия МЗС и проводить сравнение с наблюдательными данными. Модели позволяют исследовать роль льдов в химической эволюции межзвездной среды, а также в сложных процессах, таких, как рост межзвездной пыли, формирование астероидов, комет и планет.

Быстрое развитие вычислительной техники в последние десятилетия создало широкие возможности для построения численных моделей, объясняющих состав и структуру ледяных мантий пылевых частиц. Модели можно разделить на несколько категорий в зависимости от степени детализации описания физических процессов.

*Модели, использующие метод молекулярной динамики.* Метод молекулярной динамики подразумевает отслеживание временной эволюции системы атомов или молекул путем численного интегрирования их уравнений движения в реальном физическом потенциале. Иначе говоря, в моделях на основе этого метода в каждый момент времени отслеживаются положения и скорости всех атомов и молекул, входящих в модельную систему. Эти модели наиболее детальны и позволяют исследовать микроскопическую структуру льда на уровне тепловых колебаний отдельных молекул. Недостатки метода являются продолжением его достоинств: для моделирования сложной системы, включающей множество частиц и взаимодействий между ними, требуются огромные вычислительные ресурсы. С другой стороны, степень детализации, достигаемая при использовании метода молекулярной динамики, как правило, не нужна при моделировании межзвездного льда, так как наше знание физических условий в межзвездной среде и физики пыли весьма ограничено, а предска-зы-

ваемые в моделировании тонкие эффекты не видны при наблюдениях. По этим причинам метод при моделировании межзвездных льдов почти не применяется. Немногими примерами приложения метода к астрономическим задачам могут служить работы [15, 16], в которых исследуются отдельные эффекты в простых системах (несколько молекул) на очень коротких интервалах времени.

*Модели на основе «микроскопического метода Монте-Карло».* В микроскопическом методе Монте-Карло, как и в методе молекулярной динамики, отслеживается поведение отдельных атомов и молекул. Однако вместо моделирования движения молекул в реальном трехмерном потенциале отслеживается схематичное перемещение атомов и молекул между условными кубическими «ячейками» на поверхности межзвездной пылинки. Движение отдельной молекулы описывается в рамках задачи о двумерном случайном блуждании [17]. Данный метод требует существенно меньше вычислительных ресурсов, что позволяет моделировать эволюцию льдов сложного химического состава на длительных интервалах времени ( $\sim 10^5$  лет). При этом модели на основе микроскопического метода Монте-Карло позволяют учитывать такие эффекты, как неровность поверхности льда, пористость, диффузию легких молекул в толще льда и т. п. Существенным недостатком данного типа моделей в настоящее время является то, что эволюция льда в них отделена от химической эволюции в газе. При моделировании концентрации молекул в газе принимаются постоянными, что, конечно, неверно на временах порядка  $10^6$  лет. Однако этот тип моделей быстро развивается, и, возможно, указанный недостаток будет устранен в ближайшие годы.

*Модели на основе «макроскопического метода Монте-Карло».* Модели на основе этого метода еще менее детальны. Вместо движения молекул по поверхности пылевой частицы рассматриваются лишь их реакции друг с другом. Информация о пространственном положении молекул на пылинке в модели отсутствует. В то же время модель способна отслеживать, в каком из мономолекулярных слоев льда находится молекула, что позволяет разделять химически активные молекулы на поверхности льда и химически пассивные, «вмороженные» в его толщу. Важным достоинством моделей на основе макроскопического метода Монте-Карло является простота их реализации, а также возможность включить в модель как химическую эволюцию льдов, так и молекул в газе. При этом число рассматриваемых в модели химических реакций может быть очень большим, до

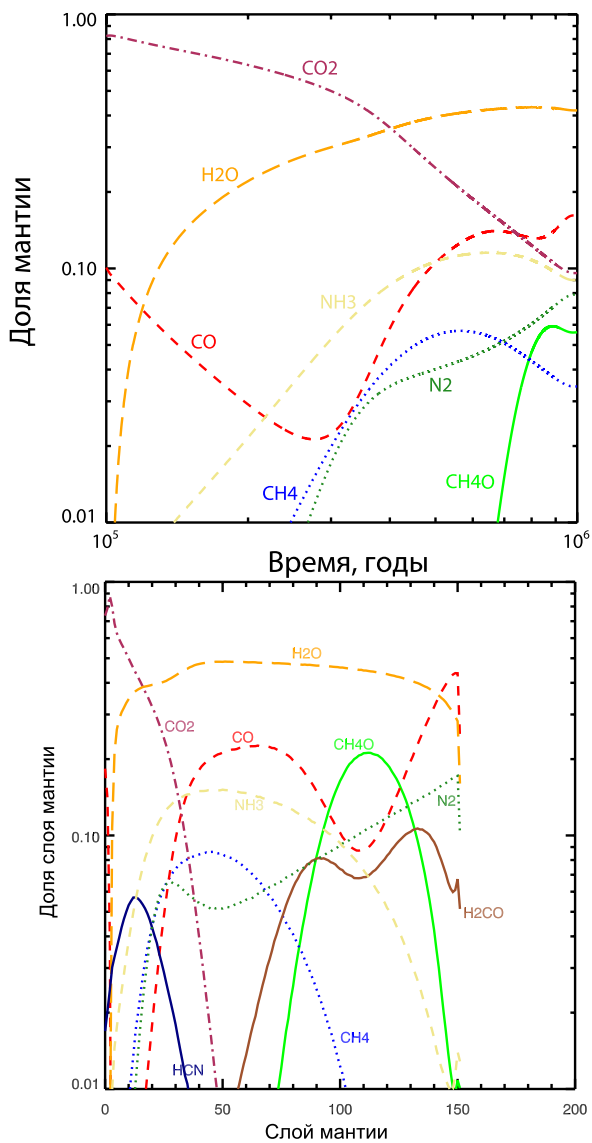


Рис. 6. Результаты моделирования эволюции состава межзвездного льда макроскопическим методом Монте-Карло (модель MONACO). Верхняя панель — эволюция состава льда со временем по мере коллапса протозвездного облака; нижняя панель — градиент химического состава льда по толщине

нескольких тысяч. В настоящее время данный класс моделей — единственный, позволяющий одновременно исследовать структуру межзвездных льдов (пусть и относительно схематично) и глобальную химическую эволюцию межзвездной среды. Модели данного типа вычислительно менее требовательны, чем модели предыдущих типов, и позволяют моделировать химическую эволюцию газа и льдов на временах порядка  $10^6$  лет, что сопоставимо с временем эволюции протозвездного облака. Тем не менее эффективность моделей на основе этого метода все еще недостаточно высока: расчет одной модели может занимать до нескольких суток. В качестве иллюстрации моделирования макроскопическим методом Монте-Карло на рис. 6 представлены результаты расчета эволюции межзвездного льда в процессе коллапса протозвездного облака на интервале  $10^6$  лет в модели MONACO, разработанной автором [18]. Данная модель качественно согласуется с наблюдательными данными о составе льда, представленными в первом разделе: отношение  $\text{CO}:\text{CO}_2:\text{H}_2\text{O}$  близко к 30:30:100,  $\text{CO}_2$  преимущественно смешан с полярным водяным льдом, тогда как CO имеет наибольшую концентрацию в наружных слоях мантии, где содержание водяного льда меньше.

*Модели на основе уравнений химической кинетики.* Модели этого типа наиболее распространены в астрохимии. Изначально они разрабатывались для описания химической эволюции межзвездного газа, а не льдов. В уравнениях химической кинетики (или балансных уравнениях) рассматриваются не отдельные молекулы, а эволюция во времени их осредненных объемных концентраций:

$$\frac{dn}{dt} = \sum_i R_i - \sum_j R_j - R_{\text{ads}} + R_{\text{des}}. \quad (12)$$

Здесь  $n$  — концентрация молекулы или атома,  $R_i$  — скорости реакции формирования молекулы,  $R_j$  — скорость реакции разрушения молекулы,  $R_{\text{ads}}$  и  $R_{\text{des}}$  — скорости адсорбции и десорбции. Модели на основе уравнений химической кинетики успешно включаются в гидродинамические модели, модели теплового баланса газа и пыли, модели переноса излучения. При всем этом уравнения химической кинетики легко поддаются численному интегрированию: расчет одной модели на современных компьютерах занимает не более нескольких секунд. Все эти достоинства делают модели на основе балансных уравнений идеальными для описания химии в газе, что и обусловило их широкое распространение. К сожалению, для описания эволюции льдов балансные уравнения подходят не столь хорошо. Во-первых,

средние объемные концентрации неприменимы для описания химии на отдельно взятой пылинке, если в данный момент молекул на ней очень мало. Допустим, мы хотим образовать молекулу водорода  $H_2$ , а средняя концентрация атомов водорода на одной пылинке в данный момент не 2, а 0.1. Поскольку средняя концентрация ненулевая, в уравнениях химической кинетики скорость образования молекулярного водорода также будет отлична от нуля. В то же время с точки зрения здравого смысла очевидно, что из одной десятой атома водорода нельзя получить одну двухатомную молекулу водорода. В действительности средняя концентрация атомов 0.1 всего лишь означает, что количество молекул на пылинке меняется со временем: большую часть времени их нет совсем, иногда есть одна молекула, иногда одновременно две, совсем редко — больше чем две. Иначе говоря, образование молекулы водорода все же возможно, но с очень низкой скоростью, намного ниже, чем получается при решении балансных уравнений. Оценить ее корректно можно лишь с помощью специальных стохастических уравнений либо методом Монте-Карло (макроскопическим или микроскопическим). Другая проблема моделей на основе уравнений химической кинетики заключается в сложности включения в них какого-либо описания структуры льда. Описание отдельных слоев льда, диффузии молекул внутри льда и т. п. к настоящему времени в моделях этого типа не реализовано. Таким образом, модели на основе балансных уравнений оптимальны для описания химии в газе, но должны применяться с осторожностью при описании химии льдов.

## Заключение

Изучение межзвездных льдов — одна из важных задач современной астрономии, требующая междисциплинарного подхода. Наблюдение льдов требует применения инфракрасной астрономии, в том числе использования космических телескопов. Объяснение наблюдательных фактов невозможно без лабораторных экспериментов, в которых используются приемы из физики поверхности, масс-спектро스코пии, техники получения сверхглубокого вакуума. Комбинирование результатов экспериментов и наблюдений, в свою очередь, невозможно без построения сложных численных моделей, требующих значительных компьютерных ресурсов. Несмотря на то что за



последние десятилетия был достигнут значительный прогресс в понимании эволюции и роли межзвездных льдов, в этой области исследований еще немало нерешенных задач, требующих внимания молодых ученых.

Автор благодарит Д. З. Вибе, Э. Хербста (E. Herbst) и О. Д. Васюнину за помощь в подготовке лекции. A. V. would like to thank the National Science Foundation (US) for supporting the University of Virginia research program in astrochemistry.

## Список библиографических ссылок

1. *Gillett F. C., Forrest W. J., Merrill K. M.* 8–13-micron spectra of NGC 7027, BD +30 3639, and NGC 6572. // *Astrophys. J.* — 1973. — Vol. 183. — P. 87–93.
2. *van Dishoeck E. F.* ISO Spectroscopy of Gas and Dust: From Molecular Clouds to Protoplanetary Disks // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 42. — P. 119–167. [arXiv:astro-ph/0403061](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0403061).
3. *Lacy J. H., Baas F., Allamandola L. J. et al.* 4.6 micron absorption features due to solid phase CO and cyano group molecules toward compact infrared sources // *Astrophys. J.* — 1984. — Vol. 276. — P. 533–543.
4. *Grim R. J. A., Baas F., Greenberg J. M. et al.* Detection of solid methanol toward W33A // *Astron. Astrophys.* — 1991. — Vol. 243. — P. 473–477.
5. *Lacy J. H., Carr J. S., Evans N. J., II et al.* Discovery of interstellar methane — Observations of gaseous and solid CH<sub>4</sub> absorption toward young stars in molecular clouds // *Astrophys. J.* — 1991. — Vol. 376. — P. 556–560.
6. *de Graauw T., Haser L. N., Beintema D. A. et al.* Observing with the ISO Short-Wavelength Spectrometer // *Astron. Astrophys.* — 1996. — Vol. 315. — P. L49–L54.
7. *Schutte W. A., Boogert A. C. A., Tielens A. G. G. M. et al.* Weak ice absorption features at 7.24 and 7.41  $\mu\text{m}$  in the spectrum of the obscured young stellar object W 33A // *Astron. Astrophys.* — 1999. — Vol. 343. — P. 966–976.
8. *Keane J. V., Tielens A. G. G. M., Boogert A. C. A. et al.* Ice absorption features in the 5–8  $\mu\text{m}$  region toward embedded protostars // *Astron. Astrophys.* — 2001. — Vol. 376. — P. 254–270.
9. *Öberg K. I., Boogert A. C. A., Pontoppidan K. M. et al.* The Spitzer Ice Legacy: Ice Evolution from Cores to Protostars // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 740. — P. 109. 1107.5825.

10. *Pontoppidan K. M., Boogert A. C. A., Fraser H. J. et al.* The c2d Spitzer Spectroscopic Survey of Ices around Low-Mass Young Stellar Objects. II. CO<sub>2</sub> // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 678. — P. 1005–1031. 0711.4616.
11. *Herbst E., Klemperer W.* The Formation and Depletion of Molecules in Dense Interstellar Clouds // *Astrophys. J.* — 1973. — Vol. 185. — P. 505–534.
12. *Hasegawa T. I., Herbst E., Leung C. M.* Models of gas-grain chemistry in dense interstellar clouds with complex organic molecules // *Astrophys. J., Suppl. Ser.* — 1992. — Vol. 82. — P. 167–195.
13. *Herbst E., van Dishoeck E. F.* Complex Organic Interstellar Molecules // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 47. — P. 427–480.
14. *van Broekhuizen F. A., Fraser H. J., Schutte W. A. et al.* A Hot Core Laboratory // *SFChem 2002: Chemistry as a Diagnostic of Star Formation* / Ed. by C. L. Curry & M. Fich. — 2003. — P. 434.
15. *Andersson S., Al-Halabi A., Kroes G.-J., van Dishoeck E. F.* Molecular-dynamics study of photodissociation of water in crystalline and amorphous ices // *J. Chem. Phys.* — 2006. — Vol. 124, № 6. — P. 064715. **arXiv: astro-ph/0512596.**
16. *Andersson S., van Dishoeck E. F.* Photodesorption of water ice. A molecular dynamics study // *Astron. Astrophys.* — 2008. — Vol. 491. — P. 907–916. 0810.1916.
17. *Cuppen H. M., Herbst E.* Simulation of the Formation and Morphology of Ice Mantles on Interstellar Grains // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 668. — P. 294–309. 0707.2744.
18. *Vasyunin A. I., Semenov D. A., Wiebe D. S., Henning T.* A Unified Monte Carlo Treatment of Gas-Grain Chemistry for Large Reaction Networks. I. Testing Validity of Rate Equations in Molecular Clouds // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 691. — P. 1459–1469. 0810.1591.

## ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИЕ АРОМАТИЧЕСКИЕ УГЛЕВОДОРОДЫ

Полициклические ароматические углеводороды — один из основных компонентов межзвездной и околозвездной среды. На их долю приходится значительная доля светимости галактик в инфракрасном диапазоне. Они связывают значительную долю атомов межзвездного углерода. В лекции рассматриваются основные свойства полициклических ароматических углеводородов, их излучение и роль, которую они играют в эволюции межзвездной среды.

Polycyclic aromatic hydrocarbons represent one of the major component of the interstellar and circumstellar medium. They account for a significant fraction of the total infrared luminosity in galaxies. Also, they bind a significant fraction of interstellar carbon atoms. In this lecture we consider main properties of polycyclic aromatic hydrocarbons, their radiation, and the role they play in the evolution of the interstellar medium.

### Введение

Избыточное излучение различных объектов Галактики в ближнем и среднем инфракрасных (ИК) диапазонах было обнаружено еще в начале 1970-х гг. при помощи наземных наблюдений. Изначально было ясно, что это излучение не может порождаться «обычными» межзвездными пылинками. Во-первых, даже в тех случаях, когда это излучение наблюдалось в фотодиссоциационных областях вблизи горячих звезд, его источник все-таки располагался слишком далеко от звезды. Обычная пыль на таких расстояниях не могла нагреться настолько, чтобы излучать в близком ИК-диапазоне. Во-вторых, в диапазоне от 3 до 20 мкм наблюдался не непрерывный спектр, а характерные полосы.

В 1983 г. один из первых космических ИК-телескопов IRAS (Infrared Astronomical Satellite) зафиксировал в Галактике излучение на длине волны 12 мкм от протяженных разреженных облаков в МЗС — так называемые инфракрасные циррусы. Обычная пыль с характерным размером  $10^{-5}$  см в диффузной межзвездной среде (МЗС) имеет

равновесную температуру 17—20 К и поэтому не может давать большого вклада в излучение на столь коротких длинах волн.

Так возникла идея о том, что в МЗС присутствуют пылинки очень маленьких размеров, точнее нечто среднее между маленькими пылинками и большими молекулами [1]. Ограниченная теплоемкость таких макромолекул приводит к тому, что они, поглощая единственный ультрафиолетовый (УФ) фотон, нагреваются до высоких температур (сотни кельвинов), а затем переизлучают поглощенную энергию в инфракрасных полосах. Наземные лабораторные эксперименты и космические наблюдения инфракрасных полос показали, что наблюдаемые спектры свойственны ароматическим соединениям и конкретно полициклическим ароматическим углеводородам (ПАУ)<sup>1</sup>.

## Строение молекул ПАУ и их земные аналоги

Полиароматические углеводороды имеют плоскую структуру, состоящую из бензольных колец и напоминающую соты. Атомы углерода соединены между собой или с атомами водорода (если атом С находится на периферии молекулы) тремя валентными связями. Оставшийся четвертый валентный электрон находится вне плоскости молекулы. Таким образом, над и под плоскостью молекулы образуется электронное облако. Чем оно обширнее, тем устойчивее частица ПАУ. В зависимости от расположения кольца в структуре к нему может присоединиться разное количество атомов водорода, от 1 до 4. Примеры структуры ПАУ показаны на рис. 1 [2, 3].

Молекулы ПАУ разделяются на два класса: пери-конденсированные (pericondensed) и орто-конденсированные (catacondensed). В первом случае один атом углерода может одновременно принадлежать трем разным кольцам. Внутри этого класса выделяют центрально-конденсированные или компактные ПАУ (например, коронен), которые называют также суперароматическими. Орто-конденсированные молекулы имеют более открытую структуру. В них атом углерода принадлежит не более чем двум разным кольцам. В этом классе также выделяют несколько подклассов: -ацены (линейные ряды колец — нафталин, антрацен, тетрацен, пентацен...) и -фены (изогнутые ряды или кольца — как показанный на рис. 1 пентафен).

---

<sup>1</sup> <http://www.astrochem.org/pahdb/>

### Пери-конденсированные

### Орто-конденсированные

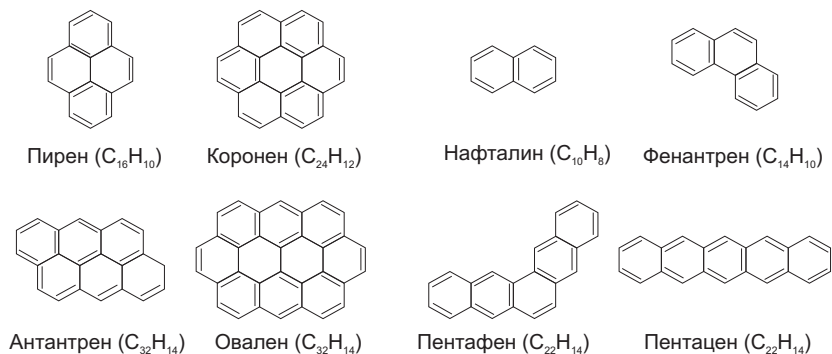


Рис. 1. Примеры строения некоторых простейших частиц ПАУ: пери-конденсированных (слева) и орто-конденсированных (справа)

Длина связи С—С примерно равна  $1.4 \text{ \AA}$ , площадь одного кольца — около  $5 \text{ \AA}^2$ . Типичная межзвездная молекула ПАУ содержит примерно 50 атомов углерода, около 20 колец и 20 периферийных атомов водорода. Размер такой молекулы — около  $6 \text{ \AA}$ . Для сравнения: размеры обычных пылинок (силикатных или графитовых), оцененные из анализа кривой межзвездного поглощения, заключены в диапазоне от 50 до  $3000 \text{ \AA}$  и даже более. Таким образом, размеры ПАУ на порядки меньше размеров обычных пылинок, и потому они имеют иные физические свойства.

ПАУ не являются исключительным компонентом межзвездной среды. Они в изобилии присутствуют на Земле, и человек повсеместно соприкасается с ними (особенно курильщики). Во-первых, полиароматические углеводороды содержатся в природных ископаемых (уголь, нефть...) и образуются при сгорании практически всех углеродосодержащих веществ: древесины, угля, бензина, табака и пр. Во-вторых, ПАУ встречаются в почве, донных отложениях, являются компонентами твердых частиц, взвешенных в воздухе.

Интересно отметить, что на Земле встреча со многими распространенными компонентами МЗС не сулит человеку ничего хорошего. Любимая наблюдателями молекула СО — это угарный газ. Не менее популярны и некоторые другие сильные яды, например HCN и метанол. ПАУ — не исключение. Многие из этих молекул опасны для человека. При контакте с ПАУ могут возникнуть как краткосрочные проблемы со здоровьем (головокружение, раздражение глаз, тошнота

та...), так и тяжелые болезни (катаракта, рак, прочие болезни почек, печени, легких). Однако, выходя за пределы Земли, мы имеем полное право (пока!) забыть об этих опасностях и безо всякого риска для здоровья изучать роль данных частиц в эволюции отдельных объектов и целых галактик.

## Излучение полиароматических углеводородов

Как уже говорилось, частицы ПАУ (как и другие мелкие пылинки) нагреваются одиночными ультрафиолетовыми фотонами. В отличие от крупных пылинок мелкие частицы при поглощении фотона мгновенно нагреваются, а потом так же быстро остывают за счет излучения в ИК-диапазоне. После остывания они остаются холодными, пока очередной фотон не нагреет их. В целом температура мелких пылинок сильно варьируется со временем, и для ее оценки нельзя пользоваться обычным уравнением баланса энергии, при помощи которого находится равновесная температура крупных пылинок.

Обычно для решения этой задачи используют различные алгоритмы моделирования стохастического поглощения пылинками УФ-фотонов и их последующего остывания. Зависимость температуры пылинок от времени выглядит как набор очень острых «пиков», показанных на рис. 2 (Павлюченков и др.; работа сдана в печать). Из-за стохастичности нагрева нельзя говорить о некой равновесной температуре мелких пылинок, однако можно рассчитать их распределение по температурам ( $\frac{dP}{dT}$ ). Его вид зависит от химического состава и структуры пылинки, ее размера, а также интенсивности поля излучения. Чем крупнее пылинка и (или) чем интенсивнее УФ-излучение, тем ближе максимум распределения к равновесному значению температуры. На рис. 3 показаны примеры распределений температуры частиц ПАУ для различных полей излучения, характеризуемых безразмерным фактором  $U$ , показывающим во сколько раз поле отличается от среднего межзвездного фона.

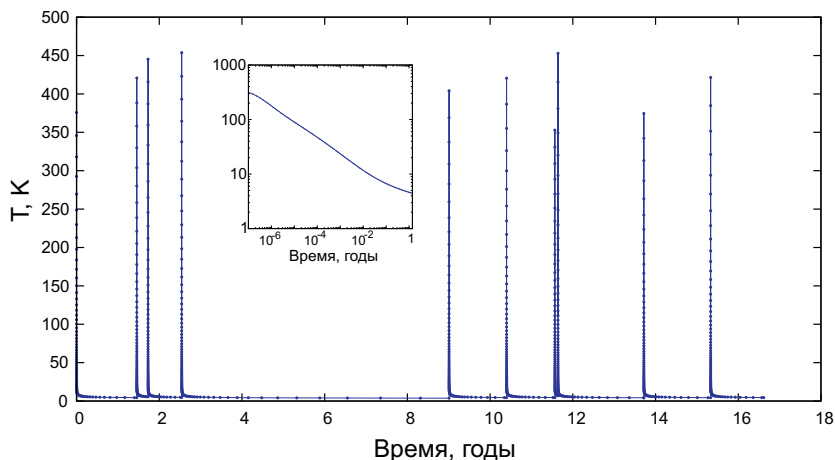


Рис. 2. Зависимость от времени температуры одиночной пылинки, освещенной средним межзвездным полем УФ-излучения. На врезке в логарифмическом масштабе показано спадание температуры пылинки после единичного акта нагрева

Нагрев частиц ПАУ приводит к возбуждению различных колебательных мод в их молекулярной структуре. Молекула ПАУ состоит из  $N_C$  атомов углерода и  $N_H$  атомов водорода и имеет  $N_m = 3(N_H + N_C - 2)$  колебательных мод. Из них  $3(N_C - 2)$  мод относятся к связям С—С и  $3N_H$  — к связям С—Н. Частоты этих колебаний вычислены только для ограниченного набора молекул. Для большинства ПАУ эти частоты неизвестны, поэтому их приходится оценивать по частотам колебаний для «типичных» ПАУ. Всего имеется пять различных типов колебаний: колебания связей С—С вне плоскости и в плоскости молекулы, изгибы связей С—Н вне плоскости и в плоскости молекулы, а также растяжение связей С—Н. Некоторые характерные полосы, возникающие в результате переходов между различными состояниями, перечислены в таблице, взятой из [4].

Чтобы посчитать спектр излучения ПАУ, необходимо знать их оптические свойства. С помощью лабораторных исследований и астрономических наблюдений в работах [5, 6] рассчитана приближенная модель для вычисления сечения поглощения ПАУ. Оно описывается

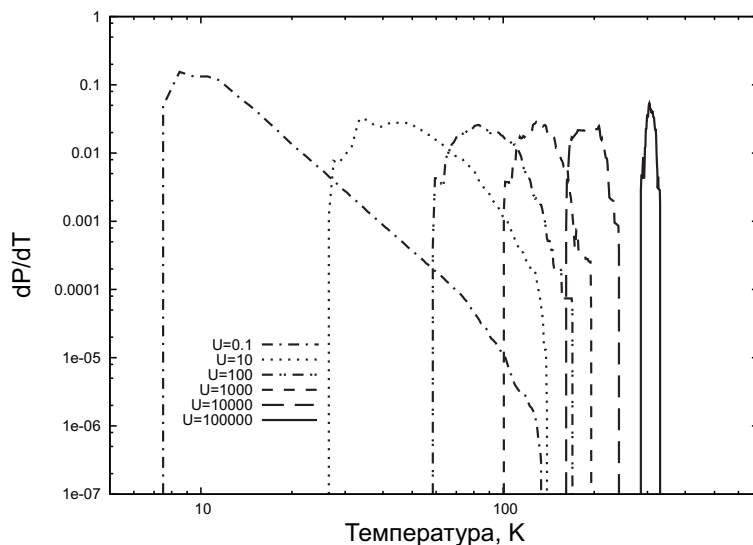


Рис. 3. Распределение частиц ПАУ по температуре для различных полей УФ-излучения. При сильном поле излучения, превышающем средний межзвездный фон в  $10^5$  раз, распределение становится почти  $\delta$ -функцией, соответствующей равновесной температуре

### Инфракрасные полосы полиароматических углеводородов

Полоса	Описание
3.3 мкм	Растяжение ароматических связей C—H
5.2, 5.65 мкм	Изгиб C—H, растяжение C—C
6.2 мкм	Растяжение ароматических связей C—C
7.6, 7.8 мкм	Растяжение C—C, изгиб C—H в плоскости молекулы
8.6 мкм	Изгиб C—H в плоскости молекулы
11, 11.2, 13.6, 14.2 мкм	Изгиб C—H вне плоскости молекулы



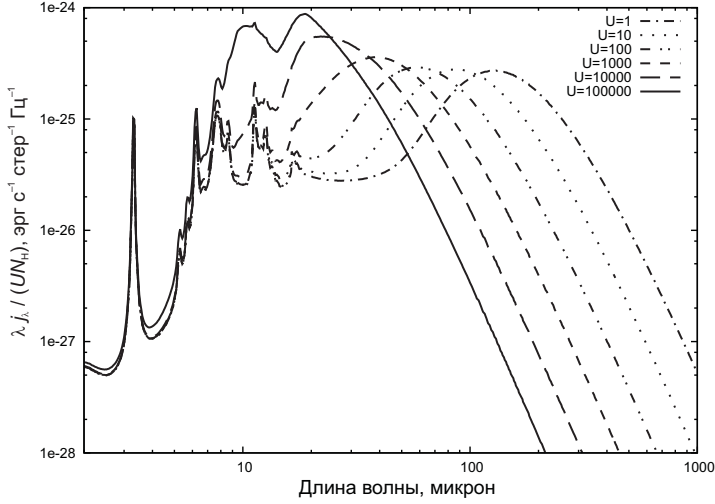


Рис. 4. Суммарный коэффициент излучения «типичных» частиц ПАУ для различных полей излучения

суммой профилей Друда для каждой полосы

$$C_{\text{abs}} = N_C \sum_{j=1}^N \frac{2}{N} \frac{\gamma_j \lambda_j \sigma_j}{(\lambda/\lambda_j - \lambda_j/\lambda)^2 + \gamma_j^2}, \quad (1)$$

где  $\lambda_j$  — центральные длины волн различных полос;  $\sigma_j$  — интегральная интенсивность линии в расчете на один атом углерода. Количество линий  $N$  зависит от того, какие особенности должны быть включены в расчет. Коэффициент излучения вычисляется по формуле

$$j_\nu(U) = \int da \frac{dn}{da} \int C_{\text{abs}}(a, \nu) B_\nu(T) \left( \frac{dP}{dT} \right)_{a,U} dT, \quad (2)$$

где  $B_\nu(T)$  — функция Планка;  $\frac{dn}{da}$  — распределение пылинок по размерам;  $\frac{dP}{dT}$  — распределение пылинок по температуре. На рис. 4 показана зависимость коэффициента излучения от длины волны для разных полей излучения.

Важной характеристикой, влияющей на излучение ПАУ, является их заряд. Степень ионизации ПАУ регулируется балансом между фотоионизацией и столкновениями пылинок с электронами и иона-

ми ( $e^-$ ,  $H^+$ ,  $C^+$  и др.). Полосы, соответствующие различным колебательным модам, для нейтральных ПАУ, катионов и анионов заметно различаются [7]. Наиболее сильно относительное содержание нейтральных и заряженных частиц отражается на положении полосы 3.3 мкм, соответствующей колебательной моде связи C—H: ее центр смещается в зависимости от доли заряженных ПАУ. За эту полосу в большей степени ответственны нейтральные и отрицательно заряженные частицы.

Изгиб и растяжение связей C—C приводят к излучению в диапазоне 6—9 мкм. У нейтральных молекул полосы, соответствующие этим модам, очень слабы, но усиливаются при увеличении количества катионов в среде [8]. Полосы на длинах волн более 10 мкм, в частности на 11.2 мкм, отражают содержание больших нейтральных частиц ПАУ. В целом по наблюдениям в ИК-диапазоне можно судить о заряде ПАУ. Однако теоретическая интерпретация наблюдений затруднена тем, что сечение фотоионизации экспериментально измерено только для ограниченного набора ПАУ (коронен, пирен и некоторые другие).

## Вклад ПАУ в эволюцию межзвездной среды

Частицы ПАУ играют в эволюции МЗС двойную роль, изменяя ее термодинамическое и химическое состояние. Одним из основных факторов их влияния на тепловой баланс МЗС является фотоэлектрический нагрев газа. Температура облаков нейтрального водорода может достигать нескольких тысяч кельвинов. Еще в 1970-х гг. было выдвинуто предположение, что газ нагревается электронами, которые выбиваются с поверхностей пылинок ультрафиолетовым излучением, а затем передают энергию газу за счет столкновений с протонами [9]. Эффективность фотоэмиссии  $Y_{pe}$  (среднее количество электронов, выбиваемых одним фотоном) зависит от заряда и размера пылинки. Она возрастает с уменьшением размера пылинки и наибольших значений достигает именно у частиц ПАУ ( $Y_{pe} \geq 0.4$ ).

При расчете скорости нагрева МЗС за счет фотоэффекта необходимо учитывать степень ионизации частиц ПАУ. После отрыва одного электрона их ионизационный потенциал резко возрастает, превосходя потенциал ионизации атомов водорода. Поэтому вклад в фотоэмиссионный нагрев вносят только нейтральные ПАУ. Как показывают наблюдения, доля положительно заряженных ПАУ в межзвездной среде [10] составляет примерно 0.5. При больших значениях

УФ-потока доля нейтральных ПАУ может снижаться до 0.2. Но даже при этом вклад ПАУ в фотоэмиссионный нагрев превышает вклад бо́льших пылинок.

Другой аспект влияния ПАУ на состояние МЗС — химические реакции, происходящие на их поверхностях, в том числе образование молекулы  $\text{H}_2$ . Детали протекания этой важнейшей для физики МЗС реакции до сих пор до конца не ясны. Вероятно, для корректного описания необходимо учитывать геометрию пылинки и ее химической состав. Однако ПАУ являются хорошим кандидатом для этого процесса. Во-первых, их поверхность составляет 2/3 от полной поверхности всей пыли в МЗС. Во-вторых, наблюдения подтверждают, что количество ПАУ коррелирует с количеством молекулярного водорода [11].

Но частицы ПАУ — не просто пассивная подложка для протекания химических реакций. Они и сами принимают участие в различных химических процессах. В первую очередь это уже упоминавшиеся процессы ионизации, в результате которых частица ПАУ приобретает положительный и отрицательный заряд. Особенно важны в химическом отношении анионы ПАУ, которые, подобно электронам и отрицательно заряженным большим пылинкам, участвуют в реакциях рекомбинации с ионизованными атомами и молекулами [12]. Иногда взаимодействие нейтральных ПАУ с молекулярными катионами может приводить к их объединению.

## **ПАУ как индикаторы физического состояния МЗС и звездообразования**

Излучение на 8 мкм составляет около 5—20 % от полного излучения галактик в ИК-диапазоне. Более половины этого излучения составляет излучение ПАУ [13]. Поскольку излучение ПАУ генерируется за счет поглощенного УФ-излучения, логично предположить, что оно действительно тем сильнее, чем больше в галактике (или в какой-либо ее области) горячих массивных звезд. В настоящее время наиболее достоверными индикаторами звездообразования в галактиках считаются линии водорода, например  $\text{H}_\alpha$  и  $\text{P}_\alpha$ . Как показывают наблюдения на инфракрасных телескопах [14], между светимостью галактики на 8 мкм и светимостью в линиях водорода действительно существует корреляция (рис. 5).

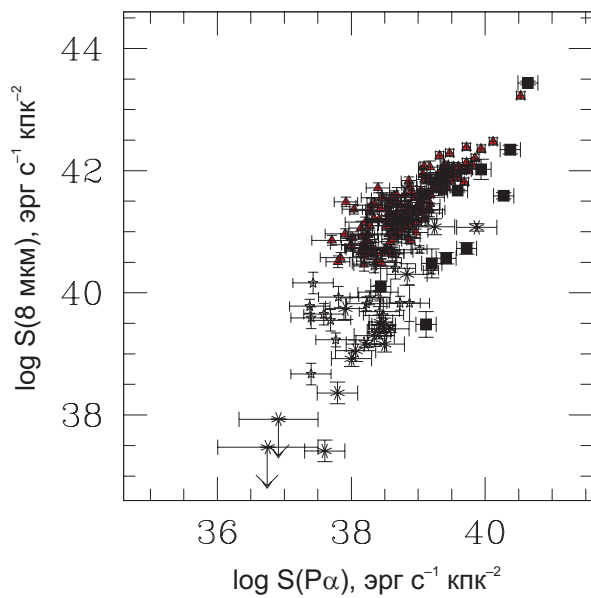


Рис. 5. Корреляция между светимостью галактики на 8 мкм и светимостью в линии  $P_{\alpha}$

Однако нужно учитывать, что светимость на 8 мкм сильно коррелирует не только с темпом звездообразования, но и с металличностью галактики, а также, в меньшей степени, с природой нагрева пылинок. Детальные исследования галактики NGC628 [15] показали, что 20—30 % излучения на 8 мкм связано с диффузным компонентом УФ-излучения, не имеющим отношения к текущему звездообразованию.

Корреляция между светимостью ПАУ и металличностью обнаружена уже более десяти лет назад [16]. Вообще, очевидно, что при меньшей металличности галактики или отдельной области звездообразования меньше и полное излучение пыли в ИК-диапазоне, поскольку от металличности зависит содержание пыли в целом. Однако для излучения на 8 мкм есть некий порог металличности, ниже которого отношение светимости на 8 мкм к полной светимости в ИК-диапазоне уменьшается примерно на порядок [17–19]. По оценкам разных авторов, пороговая металличность составляет примерно  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \approx 8.1\text{--}8.3$ . В качестве меры содержания ПАУ иногда используют отношение светимостей на 8 и 24 мкм. На рис. 6 показана зависимость металличности областей звездообразования в галактике IC10 из работы [20] от этого отношения. Видно, что для содержания кислорода ниже  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \approx 8.3$  отношение потоков на 8 и 24 мкм падает в несколько раз.

Однозначного объяснения зависимости содержания ПАУ от металличности пока нет, однако предложено несколько вариантов. Возможно, например, что в малометаллических галактиках образуется меньше ПАУ [21]. В рамках этой гипотезы предполагается, что ПАУ в основном формируются в углеродных оболочках звезд асимптотической ветви гигантов с возрастами не менее 1 млрд лет, и таких звезд мало в галактиках с низкой металличностью. Но наблюдения это не подтверждают: типичным звездным населением малометаллических галактик являются звезды с возрастами более 2 млрд лет [22].

Согласно другому предположению ПАУ, напротив, более эффективно разрушаются в поле излучения малометаллических галактик (см., например, [23, 24] и др.), поскольку УФ-спектр в них более жесткий, чем в галактиках с высокой металличностью. Также ПАУ могут эффективно разрушаться вспышками сверхновых звезд и зонами ионизованного водорода. Это, в частности, подтверждается тем, что ПАУ, как правило, много в оболочках зон НII, но они отсутствуют внутри самих областей.

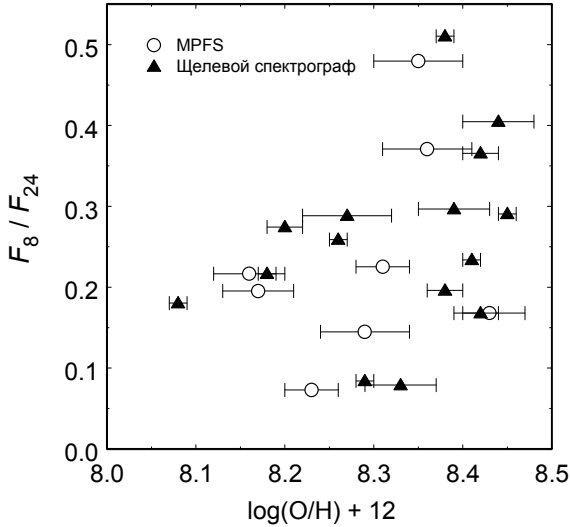


Рис. 6. Отношение потоков на 8 и 24 мкм в направлении на зоны НП в галактике IC10 как функция содержания кислорода

В целом исследования различных аспектов эволюции ПАУ, их излучения, химических свойств — в настоящее время очень «живая» тема, поскольку благодаря им, по сути, открылось новое окно в физику межзвездной среды и происходящих в ней процессов. Нужно отметить, что помимо ПАУ в межзвездной среде присутствуют (или должны присутствовать) и другие мелкие частицы: фуллерены, алифатические углеводороды, наноалмазы. Многие из этих компонентов остаются пока гипотетическими, однако по крайней мере в плотных молекулярных облаках наблюдаются углеродные цепочки ( $C_2$ ,  $C_3$  и другие). К ним также может применяться формализм, развитый для ПАУ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-02-00231.

## Список библиографических ссылок

1. Allamandola L. J., Tielens A. G. G. M., Barker J. R. Polycyclic aromatic hydrocarbons and the unidentified infrared emission bands - Auto exhaust

- along the Milky Way // *Astrophys. J., Lett.* — 1985. — Vol. 290. — P. L25—L28.
2. Клар Э. Полициклические углеводороды. — М. : Химия, 1971.
  3. *Tielens A. G. G. M.* Interstellar polycyclic aromatic hydrocarbon molecules // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2008. — Vol. 46. — P. 289—337.
  4. *Tielens A.* The physics and chemistry of the interstellar medium. — Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2005.
  5. *Draine B. T., Li A.* Infrared emission from interstellar dust. I. Stochastic heating of small grains // *Astrophys. J.* — 2001. — Vol. 551. — P. 807—824.
  6. *Draine B. T., Li A.* Infrared emission from interstellar dust. IV. The silicate-graphite-PAH model in the post-Spitzer era // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 657. — P. 810—837.
  7. *van Diedenhoven B., Peeters E., van Kerckhoven C. et al.* The profiles of the 3—12 micron polycyclic aromatic hydrocarbon features // *Astrophys. J.* — 2004. — Vol. 611. — P. 928—939.
  8. *Kim H.-S., Wagner D. R., Saykally R. J.* Single photon infrared emission spectroscopy of the gas phase pyrene cation: support for a polycyclic aromatic hydrocarbon origin of the unidentified infrared emission bands // *Physical Review Letters.* — 2001. — Vol. 86. — P. 5691—5694.
  9. *Watson W. D.* Heating of interstellar H I clouds by ultraviolet photoelectron emission from grains // *Astrophys. J.* — 1972. — Vol. 176. — P. 103—+.
  10. *Flagey N., Boulanger F., Verstraete L. et al.* Spitzer/IRAC and ISO-CAM/CVF insights on the origin of the near to mid-IR Galactic diffuse emission // *Astron. Astrophys.* — 2006. — Vol. 453. — P. 969—978.
  11. *Habart E., Boulanger F., Verstraete L. et al.* H<sub>2</sub> infrared line emission across the bright side of the rho Ophiuchi main cloud // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 397. — P. 623—634.
  12. *Wakelam V., Herbst E.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in dense cloud chemistry // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 680. — P. 371—383.
  13. *Smith J. D. T., Draine B. T., Dale D. A. et al.* The mid-infrared spectrum of star-forming galaxies: global properties of polycyclic aromatic hydrocarbon emission // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 656. — P. 770—791.
  14. *Calzetti D., Kennicutt R. C., Engelbracht C. W. et al.* The calibration of mid-infrared star formation rate indicators // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 666. — P. 870—895.
  15. *Calzetti D.* Polycyclic aromatic hydrocarbons as star formation rate indicators // *EAS Publications Series* / Ed. by C. Joblin & A. G. G. M. Tielens : EAS Publications Series. — 2011. — Vol. 46. — P. 133—141.

16. *Madden S. C.* The interstellar medium of young stellar clusters from the mid-infrared point of view // *Massive Stellar Clusters* / Ed. by A. Lançon & C. M. Boily : Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — 2000. — Vol. 211. — P. 297–+.
17. *Boselli A., Lequeux J., Gavazzi G.* Mid-IR emission of galaxies in the Virgo cluster and in the Coma supercluster. IV. The nature of the dust heating sources // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 428. — P. 409–423.
18. *Draine B. T., Dale D. A., Bendo G. et al.* Dust masses, PAH abundances, and starlight intensities in the SINGS galaxy sample // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 663. — P. 866–894.
19. *Marble A. R., Engelbracht C. W., van Zee L. et al.* An aromatic inventory of the Local Volume // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 715. — P. 506–540.
20. *Вибе Д. З., Егоров О. В., Лозинская Т. А.* Полициклические ароматические углеводороды в карликовой галактике IC 10 // *Астрон. журн.* — 2011. — Т. 88. — С. 637–647.
21. *Galliano F., Dwek E., Chanial P.* Stellar evolutionary effects on the abundances of polycyclic aromatic hydrocarbons and supernova-condensed dust in galaxies // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 672. — P. 214–243.
22. *Tosi M.* Chemical composition and evolution of irregular and blue compact galaxies. The dawn of a thirty year journey // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 500. — P. 157–158.
23. *Madden S. C., Galliano F., Jones A. P., Sauvage M.* ISM properties in low-metallicity environments // *Astron. Astrophys.* — 2006. — Vol. 446. — P. 877–896.
24. *Bendo G. J., Dale D. A., Draine B. T. et al.* The spectral energy distribution of dust emission in the edge-on spiral galaxy NGC 4631 as seen with Spitzer and the James Clerk Maxwell Telescope // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 652. — P. 283–305.



## **МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ОПАСНЫХ ДЛЯ ЗЕМЛИ АСТЕРОИДОВ И ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЯ**

В работе описывается современный подход к высокоточному прогнозированию движения опасных для Земли астероидов, приводится обзор методов поиска траекторий, приводящих к столкновению, и оценки вероятности столкновения.

The paper describes the current approach to precision prediction of motion of hazardous to the Earth asteroids, provides an overview of methods to search for paths that lead to a collision, and to estimate the probability of collision.

### **Введение**

В последние годы все большую актуальность приобретает проблема астероидной опасности. В качестве одной из причин можно указать все увеличивающееся число вновь открываемых опасных объектов. Например, по данным NASA (<http://neo.jpl.nasa.gov/neo/groups.html>), на 21 октября 2011 г. насчитывается 1 259 потенциально опасных для Земли астероидов. Кроме того, нельзя не упомянуть о наличии большого числа опасных техногенных объектов на Земле, вследствие чего падение даже небольшого космического тела в наше время может привести к глобальной катастрофе.

В связи с вышеизложенным важной является задача высокоточного прогнозирования движения опасных астероидов и оценки вероятности их столкновения с Землей. При решении этой проблемы можно выделить следующие подзадачи:

- создание высокоточных моделей движения астероида;
- построение начальных доверительных областей движения опасных объектов по результатам наблюдений;
- отображение доверительных областей во времени;

- определение траекторий, которые могут привести к столкновению с Землей;
- оценка вероятности столкновения.

В данной работе рассматриваются методы решения перечисленных задач, обсуждаются достоинства и недостатки различных подходов. Отдельное внимание уделено проблемам точности прогнозирования движения. Как известно, численное моделирование движения небесных тел обременено различного рода ошибками, среди которых можно выделить следующие: ошибки модели, ошибки интегрирования, ошибки начальных данных. Наиболее значительными обычно оказываются ошибки начальных данных. Для иллюстрации работы методов приводятся некоторые результаты исследования движения одного из наиболее опасных объектов — астероида 99942 Апофис.

## Численная модель движения астероида

Традиционно движение астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), рассматривается в рамках возмущенной задачи двух тел в гелиоцентрической системе координат, отнесенной к эклиптике или экватору эпохи 2000.0. Модель сил выбирается в зависимости от решаемой задачи и может отличаться в разных работах.

Рассмотрим используемые модели сил на примере астероида 99 942 Апофис. Наиболее полная модель используется в ИПА РАН [1]. Она включает в себя возмущения от больших планет, Плутона, Луны, Цереры, Паллады, Весты, сжатия Земли и Солнца, светового давления, релятивистских эффектов от Солнца и Юпитера и эффекта фазы. Кроме того, в работе [1] оценено влияние эффекта Ярковского на движение астероидов 6 489 Голевка, 2 100 Ра-Шалом и 99 942 Апофис. К сожалению, точный учет этого эффекта в настоящее время не всегда возможен, так как для большинства астероидов плохо известны параметры вращения.

В нашей работе [2] исследовано влияние различных возмущающих факторов на движение Апофиса. Показано, что возмущающие силы можно условно разделить на три группы по величине влияния на движение астероида. К сильным возмущениям относятся возмущения от Венеры, Земли, Юпитера, Луны, Марса, Сатурна, Меркурия. Средними являются возмущения от релятивистских эффектов от Солнца, Урана, Нептуна и светового давления. Возмущения от

Паллады, Весты, Цереры, Плутона и сжатия Земли можно отнести к слабым. Влияние сжатия Солнца, релятивистских эффектов от Юпитера и эффекта фазы на движение астероида не учитывалось. До сближения 2029 г. слабые возмущения могут не учитываться, но вследствие сближения орбита астероида значительно меняется, и даже слабые возмущения начинают оказывать значительное влияние на его положение.

Координаты больших планет в большинстве работ определяются из эфемерид DE405 и DE406. Следует отметить работу [3], в которой исследуется влияние использования различных фондов координат (DE403, DE405, EMP2004) на сближение Апофиса с Землей в 2029 и 2036 гг. В 2029 г. отличия минимальных расстояний до Земли, полученных по разным теориям движения планет, составляют несколько десятков километров, что значительно меньше ошибок, обусловленных неточностью начальных данных. Однако к 2036 г. эти отличия достигают миллионов километров, что, по-видимому, связано с неустойчивостью орбиты Апофиса после 2029 г. [4, 5].

При численном моделировании движения астероидов нельзя игнорировать тот факт, что учет возмущающих факторов также производится с некоторой погрешностью. В работе [2] исследовано влияние ошибок в возмущающих факторах на движение Апофиса. В частности, показано значительное влияние погрешностей в значении альбедо ( $0.33 \pm 0.08$ ) и диаметра ( $270 \pm 60$  м) [6] на положение астероида.

Немаловажное значение при исследовании движения потенциально опасных для Земли астероидов в рамках выбранных моделей возмущающих ускорений играют методы численного интегрирования уравнений движения. В России в настоящее время наиболее популярен интегратор Эверхарта. В зависимости от решаемой задачи и используемой разрядной сетки порядок метода может варьироваться от 15 (например, [1]) до 27 [7]. Оценка точности интегрирования обычно выполняется путем прямого и обратного интегрирования уравнений движения. Рассмотрим величину этой ошибки на примере астероида 99 942 Apophis. В работе [8] показано, что при использовании двойной точности (64-битная разрядная сетка) ошибка интегрирования на интервале 2005—2029 г. не превышает  $3 \cdot 10^{-11}$  а. е., что на два порядка меньше ошибок в определении координат Апофиса, связанных с вероятностной неопределенностью нахождения начальных параметров его орбиты из решения задачи наименьших квадратов. В нашей работе [9] численное интегрирование выполнялось мето-

дом Эверхарта более высокого 21-го порядка в среде параллельного программирования с использованием четверной точности вычислений (128-битная разрядная сетка). На примере астероида Апофис показана эффективность разработанного алгоритмического и программного обеспечения в среде параллельного программирования с использованием четверной точности вычислений, что позволяет на несколько порядков уменьшить ошибку округления и точнее учитывать влияние различных факторов при прогнозировании движения астероида.

## Построение начальных доверительных областей

Распространенным способом учета ошибки начальных данных является рассмотрение вероятностной орбитальной эволюции. Задачу исследования вероятностной эволюции можно разделить на две: построение начальной доверительной области и исследование ее эволюции со временем.

Начальная доверительная область представляется в виде эллипсоида в шестимерном пространстве координат и компонент скорости. Центром области является номинальная орбита, определяемая в результате улучшения начальных параметров методом наименьших квадратов на основе имеющихся наблюдений. Эллипсоид определяется на основе ковариационной матрицы.

Однако такое построение начальной доверительной области правомерно только при выполнении ряда условий. В частности, оно предполагает, что ошибки наблюдений случайны и независимо распределены по нормальному закону.

Если неизвестно распределение ошибок наблюдений или оно далеко от нормального, то одним из возможных способов построения начальной доверительной области является использование бутстрэп-метода [10, 11]. Идея бутстрэп-метода состоит в построении различных выборок наблюдений, при этом некоторые наблюдения могут появляться в выборке несколько раз. Путем проведения процесса улучшения орбиты по каждой получаемой выборке генерируется множество возможных векторов положений объекта. Недостатком данного метода является то, что число получаемых положений объекта зависит от числа наблюдений, т. е. метод плохо применим при малом числе наблюдений.

Построение начальной доверительной области в виде эллипсоида возможно, когда вероятностные вариации ошибок наблюдений свя-

заны с соответствующими вариациями оценок параметров орбиты объекта линейным образом. Нелинейность задачи можно оценить по отклонениям граничной уровенной поверхности функции, минимизируемой в методе наименьших квадратов, от поверхности эллипсоида. Различные способы вычисления коэффициентов нелинейности представлены в работах [12, 13].

Если задача существенно нелинейна, то представлять начальную область в виде эллипсоида нельзя. В этой ситуации можно предложить следующий вариант решения проблемы [14–16]. Способ заключается во внесении малых «возмущений» в наблюдения астероида и последующем многократном решении задачи наименьших квадратов.

Как в линейной, так и в нелинейной постановке доверительную область можно задавать в виде точек, плотно заполняющих всю область, или в виде точек, лежащих на граничной поверхности области. Способ построения начальных доверительных областей по граничным поверхностям позволяет минимизировать количество необходимых для этого точек, что приводит в дальнейшем к значительному сокращению вычислительных затрат при решении задачи отображения доверительной области на длительные интервалы времени за счет существенного уменьшения количества выходящих из начальной области траекторий [13].

## **Отображение доверительных областей во времени**

Отображение доверительной области на заданный момент времени возможно как линейным так и нелинейным методом. В линейных способах предполагается, что отклонения точек от номинальной траектории в начальной и конечной областях связаны линейными соотношениями. Линейный метод более экономичен с точки зрения временных затрат, однако его использование возможно только в случае, когда коэффициент нелинейности достаточно мал. В противном случае необходимо использовать нелинейные методы.

Возможны различные способы линейного отображения доверительной области во времени [13]. Первый способ заключается в совместном интегрировании уравнений движения для номинальной орбиты и уравнений в вариациях. На основе полученного вектора положения и матрицы изохронных производных на заданный момент времени моделируется доверительная область. Во втором способе непосредственно интегрируются уравнения для ковариационной матри-

цы. Третий способ заключается в решении задачи наименьших квадратов на заданный момент, в результате чего получаются вектор положения для номинальной орбиты и ковариационная матрица. Все рассматриваемые способы обладают своими достоинствами и недостатками, поэтому в каждом случае вопрос выбора надо решать индивидуально.

Нелинейное отображение реализуется ансамблем траекторий, выходящих из начальной области. При этом траектории должны плотно заполнять начальную вероятностную область (или ее граничную поверхность), что приводит к большим затратам времени при численном моделировании орбит. Одним из возможных путей решения проблемы является комбинированный способ отображения доверительной области [17]. В этом способе для случая, когда задача определения начальной области является слабо нелинейной, сначала выполняется линейное отображение на предельно допустимый интервал прогноза, на котором ее показатель нелинейности еще остается меньше заданного порогового значения, а затем из полученной области осуществляется нелинейное отображение.

## **Определение траекторий, которые могут привести к столкновению с Землей, и оценка вероятности столкновения**

В данном разделе приводится обзор методов поиска в доверительной области траекторий, приводящих к столкновению с Землей, и оценки вероятности столкновений. Большинство рассматриваемых методов было протестировано их авторами на примере астероида (99942) Apophis.

### **Метод статистических испытаний или метод Монте-Карло**

Наиболее простым способом выявления траекторий, приводящих к столкновениям, и оценки вероятности столкновения является способ, основанный на методе Монте-Карло. Метод заключается в том, что в рамках начальной доверительной области выбирается большое число тестовых частиц и исследуется их эволюция со временем. В процессе исследования отслеживается расстояние до Земли и регистрируются столкновения. Отношение числа столкнувшихся частиц к общему числу может рассматриваться как вероятность столкновения. Данным способом оценивается вероятность столкновения Апо-

фиса с Землей во многих работах (например, [9, 18]). Недостатком метода является необходимость исследования орбитальной эволюции очень большого числа тестовых частиц, что даже при использовании многопроцессорных вычислительных систем не всегда возможно. В следующих рассматриваемых методах сделана попытка решить эту проблему.

### **Метод линии вариации**

В работах А. Милани с соавторами [19, 20] применяется упрощенный подход к выявлению столкновительных орбит в начальной доверительной области, основанный на одномерном поиске таких орбит вдоль одного из главных направлений эллипсоида ошибок, а именно вдоль его наибольшей оси. Такой подход правомерен в случаях, когда размеры эллипсоида ошибок по другим главным направлениям, т. е. направлениям других его осей, на несколько порядков меньше размера вдоль наибольшей оси. Фактически такой подход означает, что начальная доверительная область заменяется в шестимерном фазовом пространстве отрезком прямой линии, совпадающим с наибольшей осью эллипсоида. Далее, вдоль этого отрезка с мелким шагом перебираются все точки фазового пространства, и для них вычисляются обстоятельства рассматриваемого сближения с Землей. Если для какой-либо точки минимальное расстояние до центра Земли во время сближения меньше радиуса Земли (с учетом атмосферы), то это и есть найденная столкновительная орбита.

Кроме того, в указанных выше работах А. Милани вводится понятие «плоскости цели», под которой понимается плоскость, перпендикулярная геоцентрической скорости астероида на номинальной орбите в момент столкновения с Землей. Она используется как плоскость, на которую производится отображение начального эллипсоида ошибок с помощью упрощенной линеаризованной формулы, включающей изохронные производные.

Недостатком рассматриваемого метода является возможность «упустить» столкновительные траектории, не лежащие на главной оси эллипсоида ошибок. Для устранения этого недостатка вводится второй этап, который заключается в поиске столкновительных орбит в окрестности, найденной на первом этапе. Однако даже если точка минимума на главной оси эллипсоида имеет расстояние до центра Земли, превышающее ее радиус, то столкновительная область все равно может существовать. Такое возможно, когда ширина довери-

тельного эллипса в плоскости цели значительна. Основным решением в этом случае является линеаризация отображения начальной области возможных движений на целевую плоскость. Тогда начальный доверительный эллипсоид переходит в эллипс, и, если этот эллипс пересекает сечение Земли, то полученное сечение является областью столкновительных орбит.

Следует заметить, что главная ось эллипсоида ошибок обычно связана с одним из элементов орбиты. В частности, для орбиты, найденной по короткой дуге, таким элементом является среднее движение астероида. В этом случае возможен поиск столкновительных траекторий путем исследования эволюции большого числа тестовых частиц с различными значениями среднего движения [1]. После нахождения частицы, проходящей на минимальном расстоянии от центра Земли, на втором этапе фиксируется найденное значение среднего движения и улучшаются остальные параметры орбиты.

Достоинством данного метода является простота оценки вероятности столкновения, которая определяется следующей формулой:

$$P_{\oplus} = \frac{2R_{\oplus}}{\Gamma_{МТР}} P_d(\sigma), \quad (1)$$

где  $\Gamma_{МТР}$  — отношение наибольшей оси эллипса на плоскости цели к среднеквадратической ошибки в среднем движении  $\sigma$ ;  $P_d(\sigma)$  — принятая функция плотности вероятности;  $R_{\oplus}$  — радиус Земли.

### **Метод минимизации перигейного расстояния как функции от начальных координат и скоростей**

В работах В. В. Ивашкина и К. А. Стихно [21, 22] предложен метод поиска столкновительных орбит, который заключается в минимизации перигейного расстояния как функции от начальных координат и скоростей. Исходными данными в методе являются заданный на начальный момент вектор номинальных параметров и соответствующая ему ковариационная матрица. Последующее отображение начальной области на моменты сближений астероида с Землей осуществляется нелинейным способом (в виде ансамбля траекторий, выходящих из начальной области). На первом этапе осуществляет поиск сближений для номинальной орбиты и некоторого небольшого числа тестовых частиц (около 1 000). На втором этапе из всего множества траекторий выделяются «опасные» траектории, для которых перигейные расстояния меньше некоторого заданного значения (например, 1 000 000 км). На третьем этапе, который является наиболее



сложным, определяются итерационным методом градиентного спуска локальные минимумы функции перигейных расстояний на множестве возможных начальных параметров движения астероида. В качестве начальных приближений в градиентном методе используются значения начальных параметров «опасных» траекторий.

Следует заметить, что метод нахождения столкновительных орбит в работах [21, 22] проще методов, применяемых А. Милани, и имеет также свои недостатки. В частности, итерационный процесс в методе градиентного спуска может быть в ряде случаев расходящимся, а начальная область возможных движений не покрывать с заданной вероятностью истинную начальную точку траектории объекта.

### **Резонансный возврат к тесным сближениям**

В работе С. Чесли [23] для выявления потенциальных столкновений астероида Апофис с Землей используется идея так называемого резонансного возврата. Термин «резонансный возврат» определяет тесное сближение или столкновение небесных тел, которое в некотором смысле порождается предшествующим тесным сближением. Это происходит, когда первое сближение меняет орбиту астероида таким образом, что его период становится соизмеримым с периодом Земли. Орбитальный резонанс, как известно, сохраняет геометрическую конфигурацию «малое тело—планета». Если периоды обращения планеты и астероида соизмеримы, т. е. их отношение примерно равно отношению целых чисел  $k/h$ , то после  $h$  периодов астероида и  $k$  периодов планеты оба тела вернутся снова к тому же самому геометрическому положению, как и в предыдущем сближении. Например, если вследствие сближения 2029 г. Апофис войдет во внешний резонанс с Землей  $7/6$  с периодом 426 дней, то он вернется через 6 оборотов и 7 лет примерно в ту же точку, в которой будет Земля. Таким образом, произойдет резонансный возврат в 2036 г. Если резонанс не является точным, но близким к нему (что обычно имеет место в орбитальных резонансах), последующее сближение может иметь место, но сближение с планетой будет несколько раньше или позже, чем это было в предыдущий раз.

Аналитическая теория резонансного возврата изложена в работе [24]. Авторы этой работы развили известную теорию Эпика [25] планетных тесных сближений и, используя идею резонансного возврата, вывели соотношения, позволяющие вычислять началь-

ные условия для каждого последующего сближения как функцию от результатов предыдущего сближения. Полученные аналитические формулы не являются заменой точного численного интегрирования, однако позволяют вычислять в плоскости цели местоположение, форму и размеры так называемой замочной скважины. «Замочная скважина» — еще один термин данной теории, который определяет маленькую область на плоскости цели предшествующего сближения, через которую астероид должен пройти, чтобы произошел резонансный возврат. Другими словами, «замочная скважина» — это область столкновительных орбит в плоскости цели предыдущего сближения.

### **Метод точечных гравитационных сфер**

Данный метод [3, 26] заключается в том, что гравитационная сфера планеты стягивается в точку и исследуемая траектория астероида аппроксимируется последовательностью кеплеровых гелиоцентрических орбит соударения с планетами. В момент соударения происходит преобразование скорости — вектор планетоцентрической скорости поворачивается на угол между асимптотами планетоцентрической гиперболы, модуль планетоцентрической скорости при этом остается неизменным. Угол поворота зависит от прицельного расстояния, при этом перицентрическое расстояние не должно быть больше радиуса планеты. Рассматривая множество траекторий, составленных из резонансных орбит соударения Апофиса с Землей, авторам метода удалось получить столкновительные орбиты в различные годы от 2036 до 2052 включительно.

### **Метод наименьших квадратов с ограничениями**

В работах Г. Ситарского [27, 28] для нахождения траекторий орбит используется метод наименьших квадратов с ограничениями. В результате определяются орбиты, на которых астероид может столкнуться с Землей, а также минимальное значение среднеквадратического остатка для такой столкновительной орбиты. Последнее значение может служить мерой вероятности столкновения. Задача ставится следующим образом. Известна орбита астероида с начальными значениями прямоугольных координат и компонент скорости, хорошо представляющая наблюдения. Интегрированием уравнений движения находится момент тесного сближения астероида с Землей. Нужно найти такие поправки к начальным параметрам, чтобы новая орбита хорошо представляла наблюдения и чтобы в данный момент

астероид ударился о земную поверхность. Решение ищется методом наименьших квадратов с ограничениями, из которого находятся поправки к координатам.

### **Метод выявления столкновительных орбит с помощью минимизации произведения двух целевых функций**

Задача поиска столкновительных орбит заключается в одновременной минимизации двух целевых функций — среднеквадратической ошибки представления наблюдений и расстояния до Земли в момент сближения [29]. Возможны различные варианты — минимизация суммы и произведения этих целевых функций. Недостатком первого способа является необходимость введения весовых коэффициентов, которые можно определить только приблизительно. Второй способ свободен от этого недостатка. Рассмотрим его более подробно.

Поиск столкновительных траекторий производится в три этапа. На первом этапе выявляются тесные сближения астероида с Землей по номинальной орбите. На втором этапе производится минимизация произведения двух целевых функций. При этом расстояние до Земли определяется на момент найденного тесного сближения. Необходимость третьего этапа обусловлена тем, что в окрестности этого момента сближение может быть еще более тесным. Поэтому на третьем этапе производится исправление момента сближения путем минимизации квадрата расстояния до Земли в функции только времени при найденных на втором этапе и зафиксированных начальных условиях. Второй и третий этапы повторяются итерационно, пока расстояние до центра Земли не перестанет убывать.

Недостатком рассматриваемого метода является не единственность решения, так как минимум произведения двух величин в общем случае не совпадает с минимумами каждой из величин по отдельности.

## **Заключение**

Таким образом, в данной работе представлена методика численного моделирования движения опасных для Земли астероидов. Рассмотрены различные модели сил, используемые при исследовании эволюции опасных астероидов. Отдельное внимание уделено проблемам точности, описаны ошибки, возникающие при численном моделировании и способы борьбы с ними. В статье также обсуждаются

линейные и нелинейные способы построения доверительных областей и исследования их эволюции, даны рекомендации по их использованию.

Кроме того, в статье представлен обзор методов поиска в доверительной области траекторий, приводящих к столкновению с Землей. Показано, что каждый метод имеет свои достоинства и недостатки. Однако ни один из рассмотренных методов не может всегда гарантировать однозначный ответ на вопрос о вероятности столкновения. По-видимому, стоит рекомендовать подбирать метод оценки вероятности столкновения индивидуально, более того, в ряде случаев для получения полной картины следует использовать несколько различных методов.

Автор выражает благодарность В. А. Авдюшеву, Т. В. Бордовицыной, Л. Е. Быковой, Ю. А. Чернетенко, А. М. Черницову за ценные консультации. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 11-02-00918-а.

## Список библиографических ссылок

1. Кочетова О. М., Чернетенко Ю. А., Шор В. А. Насколько точна орбита астероида (99942) Апофис и какова вероятность столкновения с ним в 2036—2037 гг. // Астрон. вестн. — 2009. — Т. 43, вып. 4. — С. 338—347.
2. Быкова Л. Е., Галушина Т. Ю. Моделирование движения астероида (99942) Апофис до и после тесного сближения с Землей 13 апреля 2029 г. // Околоземная астрономия 2009 : сб. тр. конф., Казань, 22—26 авг. 2009 г. — М. : Изд-во ГЕОС, 2010. — С. 140—148.
3. Соколов Л. Л., Башаков А. А., Питъев Н. П. Особенности движения астероида 99942 Apophis // Астрон. вестн. — 2008. — Т. 42, вып. 1. — С. 20—29.
4. Галушина Т. Ю., Раздымакина О. Н. О предсказуемости движения астероидов, проходящих через сферу тяготения Земли // Вестн. СибГАУ. — 2011. — Вып. 6(39). — С. 9—14.
5. Быкова Л. Е., Галушина Т. Ю., Раздымакина О. Н. Сравнительный анализ численных методов оценивания времени предсказуемости движения АСЗ // Изв. вузов. Физика. — 2011. — Т. 54, вып. 6/2. — С. 22—30.
6. Delbo M., Cellino A., Tedesco E. F. Albedo and size determination of potentially hazardous asteroids: (99942) Apophis // Icarus. — 2007. — Vol. 188. — P. 266—269.

7. *Быкова Л. Е., Галушина Т. Ю.* Алгоритмическое и программное обеспечение решения задач динамики астероидов, сближающихся с Землей, в среде параллельного программирования // Изв. вузов. Физика. — 2009. — Т. 52, вып. 10/2. — С. 12—19.
8. *Виноградова Т. А., Кочетова О. М., Чернетенко Ю. А. и др.* Орбита астероида (99942) Апофис, определенная из оптических и радарных наблюдений // Астрон. вестн. — 2008. — Т. 42, вып. 4. — С. 291—300.
9. *Быкова Л. Е., Галушина Т. Ю.* Исследование движения астероида (99942) Апофис с использованием многопроцессорной вычислительной системы СКИФ Cyberia // Космич. исслед. — 2010. — Т. 48, вып. 5. — С. 419—426.
10. *Efron B.* Bootstrap methods: another look a nife // Ann. Statist. — 1979. — Vol. 7, iss. 1. — P. 1.
11. *Десмарс Джс., Арлот Джс.-Е., Венне А.* Оценка точности сближения методом bootstrap // Космич. исслед. — 2010. — Т. 48, вып. 5. — С. 484—490.
12. *Сюсина О. М., Черницов А. М., Тамаров В. А.* Оценивание нелинейности в задачах построения начальных доверительных областей движения малых тел // Изв. вузов. Физика. — 2011. — Вып. 6/2. — С. 71—77.
13. *Сюсина О. М., Черницов А. М., Тамаров В. А.* Построение доверительных областей в задаче вероятностного исследования движения малых тел Солнечной системы // Астрон. вестн. (В печати).
14. *Заботин А. С., Медведев Ю. Д.* Определение орбит и эллипсоидов рассеяния потенциально опасных для Земли астероидов // Тр. ИПА РАН. — 2008. — Вып. 19. — С. 68—78.
15. *Авдюшев В. А.* Новый метод для статистического моделирования возможных значений параметров в обратных задачах орбитальной динамики // Астрон. вестн. — 2009. — Т. 43, вып. 6. — С. 565—574.
16. *Sitarski G.* Motion of the Minor Planet 4179 Toutatis: Can We Predict Its Collision with the Earth // Acta Astronomica. — 1998. — Vol. 48. — P. 547—561.
17. *Сюсина О. М., Черницов А. М., Тамаров В. А.* Комбинированный способ отображения доверительных областей движения малых тел на произвольный момент времени // Изв. вузов. Физика. — 2011. — Вып. 6/2. — С. 63—70.
18. *Железнов Н. Б.* Влияние корреляционных связей между орбитальными параметрами астероида на определение вероятности его столкновения с планетой методом Монте-Карло // Астрон. вестн. — 2010. — Т. 44, вып. 2. — С. 150—157.

19. *Milani A., Chesley S. R., Boattini A., Valsecchi G. B.* Virtual impactors: search and destroy // *Icarus*. — 2000. — Vol. 145. — P. 12–24.
20. *Milani A., Valsecchi G. B.* Asteroid close encounters with Earth: risk assessment // *Planet. Space Sci.* — 2000. — Vol. 48. — P. 945–954.
21. *Ивашкин В. В., Стихно К. А.* О предотвращении возможного столкновения астероида Апофис с Землей // *Астрон. вестн.* — 2009. — Т. 43, вып. 6. — С. 502–516.
22. *Стихно К. А.* Метод поиска траекторий опасных небесных тел, приводящих к столкновению с Землей // *Вестн. СибГАУ*. — 2011. — Вып. 6(39). — С. 46–50.
23. *Chesley S. R.* Potential impact detection for near-Earth asteroids: The case of 99942 Apophis (2004 MN4) // *Asteroids, Comets, Meteors : Proc. IAU Symp. 229th / Eds. D. Lazzaro, S. Ferraz-Mello, J. A. Fernandes.* — 2006. — P. 215–228.
24. *Valsecchi G. B., Milani A., Gronchi G.-F., Chesley S. R.* Resonant returns to close approaches: analytical theory // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 408. — P. 1179–1196.
25. *Opik E. J.* Collision probabilities with the planets and distribution of interplanetary matter // *Proc. R. Irish Acad.* — 1951. — Vol. 54. — P. 165.
26. *Елькин А. В., Соколов Л. Л., Титов В. Б., Шмыров А. С.* Квазислучайные движения в гравитационном поле N планет // *Тр. астроном. обсерватории СПбГУ*. — 2003. — Т. XLV. — С. 73–114.
27. *Sitarski G.* How to Find an Impact Orbit for the Earth-Asteroid Collision // *Acta Astronomica*. — 1999. — Vol. 49. — P. 421–431.
28. *Sitarski G.* Generating of "Clones" of an Impact Orbit for the Earth-Asteroid Collision // *Acta Astronomica*. — 2006. — Vol. 56. — P. 283–292.
29. *Батурин А. П.* Поиск столкновительных орбит астероидов, сближающихся с Землей, с помощью минимизации произведения двух целевых функций // *Изв. вузов. Физика*. — 2011. — Т. 54, вып. 6/2. — С. 103–109.

## **МОЛЕКУЛЫ В РАННЕЙ ВСЕЛЕННОЙ**

Описаны оценки содержания молекул во Вселенной в пост-рекомбинационную эпоху и попытки обнаружения деталей в спектре микроволнового реликтового фона, обусловленных этими молекулами, а также результаты поиска радиолиний молекул в спектрах наиболее далеких галактик.

We describe estimates of molecular content in the post-recombination Universe and attempts to detect features in the CMBR spectrum caused by these molecules, as well as results of the searches for molecular radio lines in the spectra of the most distant galaxies.

### **Введение**

Термин «ранняя Вселенная» является не вполне определенным. Иногда так называют первые минуты жизни нашей Вселенной. Чаще он относится к первым миллиардам лет ее существования (напомним, что возраст Вселенной оценивается сейчас примерно в 14 млрд лет). Здесь мы будем пользоваться вторым определением.

В истории Вселенной были свои «темные века» — период от эпохи рекомбинации до образования первых звезд и галактик. Это самое загадочное время (не считая первых мгновений), о котором пока нет никакой наблюдательной информации. Но именно в этот период зарождались первые протообъекты. Конечно, хочется увидеть, как это было. Согласно общепринятым воззрениям в то время во Вселенной не было ничего, кроме простейших элементов — водорода, гелия и некоторых других. Они могли образовывать простые молекулы, наблюдения линий этих молекул — практически единственный способ заглянуть в эту загадочную эпоху.

Позже, когда появились звезды и галактики, стали образовываться тяжелые элементы и химический состав Вселенной начал меняться. Информацию о химии этого периода опять же можно получить лишь из спектральных наблюдений, в том числе наблюдений молекулярных линий в радиодиапазоне.

Ниже мы опишем работы по оценке содержания молекул в «темные века» и попытки их обнаружения, а также исследования молекулярного состава далеких галактик. Остановимся также на перспективах этих исследований, связанных с появлением новых высокочувствительных инструментов.

## Молекулы в «темные века» Вселенной

Пойди туда — не знаю куда,  
принеси то — не знаю что.

Как уже отмечалось, элементный состав Вселенной в этот период небогат. Это в основном H, D, He и Li. По мере расширения и охлаждения Вселенной они могут образовывать такие молекулы, как  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2^+$ ,  $\text{HeH}^+$ , HD,  $\text{HD}^+$ , LiH,  $\text{LiH}^+$  и некоторые другие. Одним из пионеров в исследованиях химии «темных веков» был В. К. Дубрович [1]. Рядом авторов были построены детальные модели химической эволюции в рассматриваемую эпоху (например, [2, 3] и др.). Пример таких расчетов, заимствованный из работы [3], приведен на рис. 1. В этой работе на основе улучшенных квантово-механических расчетов показано, что ожидаемое содержание  $\text{HeH}^+$  примерно на порядок выше, чем считалось ранее.

В стандартной модели химической эволюции Вселенной после Большого взрыва количество тяжелых элементов ничтожно мало. Однако в некоторых нестандартных моделях, тем не менее согласующихся с наблюдениями, возможно появление заметного количества подобных элементов. В ряде работ рассмотрено образование молекул, содержащих тяжелые элементы. Среди таких молекул самой распространенной, скорее всего, может быть молекула CH [4].

Таким образом, некоторое количество простых молекул, по-видимому, должно было присутствовать в «темные века» Вселенной, хотя их относительные концентрации, согласно даже оптимистическим оценкам, на порядки ниже тех, которые характерны для молекулярных облаков Галактики. Есть ли надежда увидеть эти молекулы и каким образом можно пытаться это сделать? Нужно иметь в виду, что мы по сути не знаем ни частоты (которая зависит от неизвестного красного смещения источника), ни направления поиска. Кроме того, неопределенным является и состояние возбуждения этих молекул. В молекулярных облаках Галактики возбуждение молекул определяется конкуренцией столкновений с атомами и молеку-



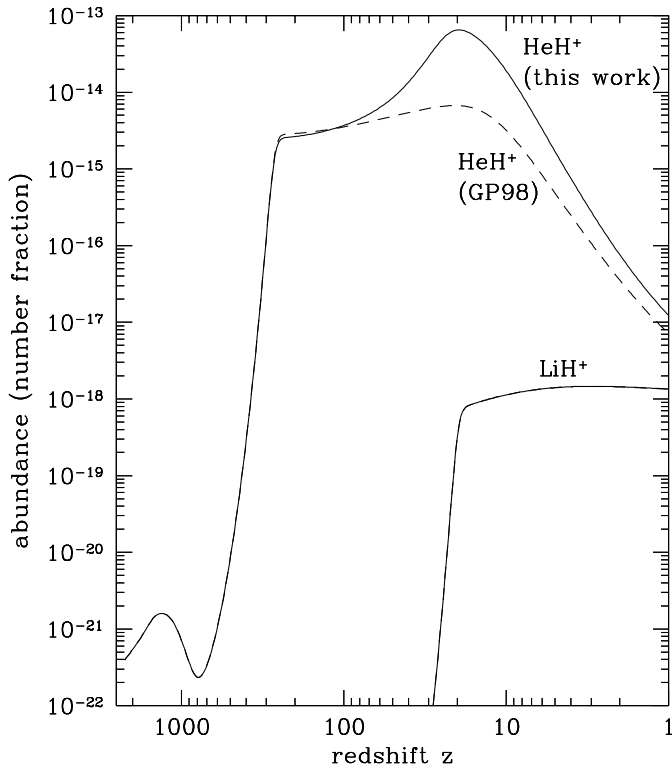


Рис. 1. Относительное содержание HeH<sup>+</sup> и LiH<sup>+</sup> в пострекомбинационную эпоху в зависимости от красного смещения [3]. Штриховой линией показаны результаты прежних расчетов для HeH<sup>+</sup> [2](рисунок из работы [3])

лами окружающего газа, с одной стороны, и радиационных процессов — с другой. Протообъекты, о которых идет речь, вероятно, имеют очень низкую плотность, так что соударения, скорее всего, несущественны. Звезд еще нет, и поле излучения сводится к изотропному чернотельному микроволновому фону — реликту Большого взрыва. В первом приближении молекулы находятся в равновесии с этим полем излучения, а поскольку все измерения проводятся в сравнении с фоном, никаких линий ожидать не приходится.

Есть, однако, возможность что-то увидеть даже в этих условиях. Пекулярные движения протообъектов относительно микроволнового фона при резонансном рассеянии фотонов этого фона мо-

лекулами приводят к флуктуациям яркостной температуры фона с амплитудой  $\Delta T/T \sim (v/c)\tau$ , где  $v$  — скорость пекулярных движений;  $\tau$  — оптическая толщина [1]. Это так называемые спектрально-пространственные флуктуации. Возможно их усиление за счет эффектов люминесценции [5]. Оптимистические оценки дают  $\Delta T/T \sim \sim 2 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-6}$  [6] (это флуктуации, обусловленные молекулами  $\text{HeH}^+$  в интервале красных смещений  $z = 20-30$ ). Предпринимавшиеся попытки обнаружить такие флуктуации пока не привели к успеху [7, 8].

Другое направление поисков связано с попытками обнаружить «нормальные» спектральные линии от далеких протообъектов в предположении, что их плотности и температуры могут быть достаточны для столкновительного возбуждения молекул. Много лет назад нами была сделана оценка возможных искажений спектра реликтового фона типичными на сегодняшний день облаками, содержащими молекулы CO, в предположении, что они формируются на красных смещениях  $z \sim 30$  [9]. Эффективная оптическая толщина при этом вряд ли превышает  $\sim 10^{-5}$ . Недавно была предпринята попытка поиска спектральных линий в направлении двух «горячих пятен» на карте микроволнового фона [10]. Наблюдения проводились при помощи космического телескопа Odin [11] в нескольких частотных интервалах от  $\sim 490$  до  $\sim 580$  ГГц. Эти наблюдения дали только верхние пределы возможной интенсивности линий. Подозрительная деталь, зафиксированная в наблюдениях 2007 г., не подтвердилась последующими наблюдениями (рис. 2).

Таким образом, на сегодняшний день нет никаких наблюдательных подтверждений существования молекул в «темные века» Вселенной, но работа в этом направлении продолжается, и, возможно, с появлением новых инструментов удастся либо обнаружить соответствующие спектральные детали, либо получить существенно более жесткие ограничения на их амплитуду.

## Молекулы в далеких галактиках

Химия Вселенной вскоре после появления первых звезд и галактик пока практически не изучена. В какой-то мере помочь могут наблюдения карликовых галактик с низкой металличностью, условия в которых, вероятно, близки к тем, которые имели место в далеком прошлом. Но все-таки ничто не может заменить непосредственные наблюдения объектов на больших красных смещениях.

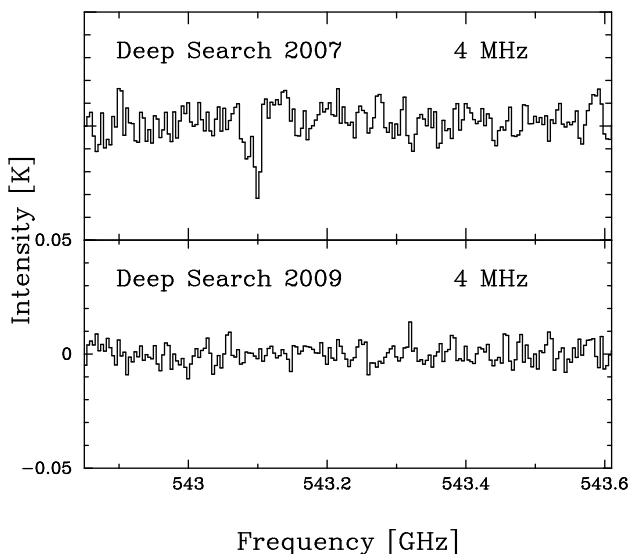


Рис. 2. Результаты поиска спектральных линий на космическом телескопе Odin в направлении одного из «горячих пятен» микроволнового фона в 2007 и в 2009 гг. (рисунок из работы [10])

Задача эта несколько проще предыдущей, поскольку обычно известны и направление поиска, и частота. Тем не менее число зарегистрированных молекул на  $z > 2$  пока очень мало. Не считая молекул CO, которые наблюдаются в самых далеких известных галактиках, к настоящему времени по наблюдениям их радиолиний обнаружены молекулы HCN, HNC, HCO<sup>+</sup>, CN, H<sub>2</sub>O (например, [12–17]). Интенсивность линий, наблюдаемых в далеких галактиках, очень мала, и их регистрация при помощи современных радиотелескопов требует накопления сигнала в течение многих часов. Кроме того, в оптическом диапазоне наблюдались линии H<sub>2</sub> и HD [18], что позволило получить независимую оценку средней плотности барионов во Вселенной [19].

Как уже отмечалось, одной из самых интересных для изучения ранней Вселенной молекул является молекула HeH<sup>+</sup>, которая до сих пор в космосе не обнаружена. В то же время имеющиеся модели предсказывают довольно высокое обилие этой молекулы вблизи источников рентгеновского и экстремального УФ излучения [20, 21]. Частота нижнего вращательного перехода этой молекулы (примерно

2 ТГц) недоступна для наблюдений с поверхности Земли. В наблюдениях на спутнике ISO была зарегистрирована довольно сильная эмиссионная линия на данной частоте в направлении планетарной туманности NGC 7027 [22]. Однако низкое спектральное разрешение инструмента не позволило отделить возможную линию  $\text{HeH}^+$  от близко расположенных линий  $\text{CN}$ .

Нами недавно предпринята попытка поиска этой линии в спектре одного из самых далеких квазаров — SDSS J114816.64+525150.3 ( $z = 6.4189$ , в рамках стандартной космологической модели такое красное смещение соответствует возрасту Вселенной примерно 870 млн лет) [23]. Ранее в нем было обнаружено довольно сильное излучение CO [24–26] и  $\text{C}^+$  [27] (рис. 3).

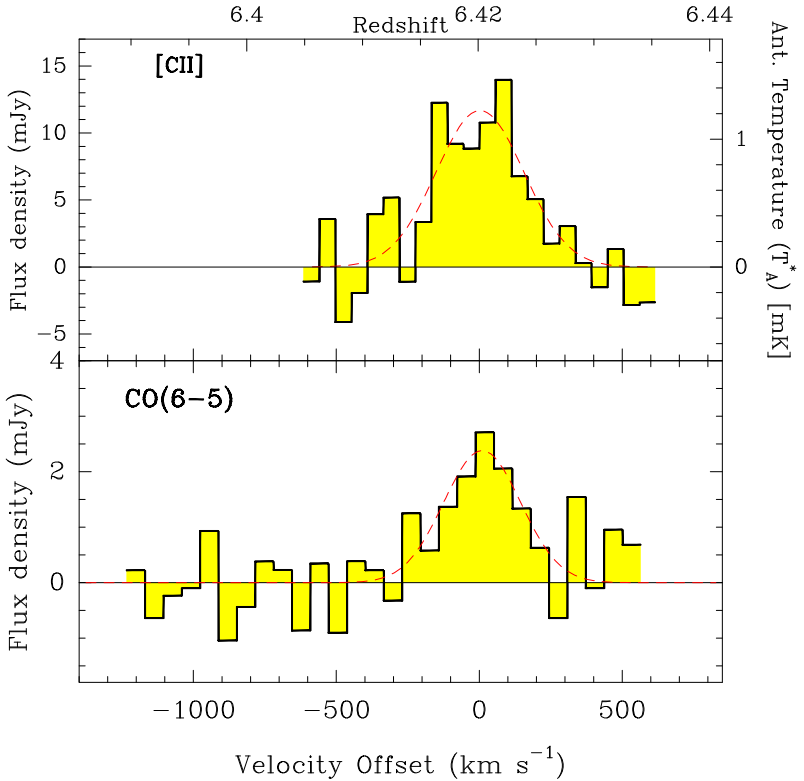


Рис. 3. Спектры излучения квазара SDSS J114816.64+525150.3 ( $z = 6.4189$ ) в линиях CO и  $\text{C}^+$  (рисунок из работы [27])

Наши наблюдения проходили в январе 2011 г. на 30-м радиотелескопе Института миллиметровой радиоастрономии, расположенном на горе Пико Велета в Испании. Общее время накопления составило 20 часов. Полученный спектр с разрешением 16 МГц (что соответствует разрешению по скорости 18 км/с) представлен на рис. 4.

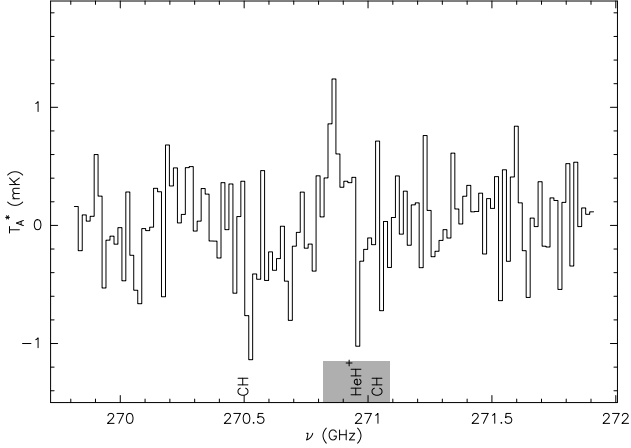


Рис. 4. Усредненный спектр излучения квазара SDSS J114816.64+525150.3 с разрешением 16 МГц после вычитания базовой линии нулевого порядка. Показаны ожидаемые положения линий  $\text{HeH}^+$  и  $\text{CH}$ . Ширина затененной области соответствует ширине линий  $\text{CO}$  и  $\text{C}^+$  (300 км/с) (рисунок из работы [23])

В этом спектре видна возможная линия излучения (на уровне  $2.9\sigma$ ) вблизи ожидаемой частоты перехода  $\text{HeH}^+$ . Ширина этой возможной линии ( $68 \pm 36$  км/с) в несколько раз меньше ширины линий  $\text{CO}$  и  $\text{C}^+$  (300 км/с). Разница в положении и в ширине линий может объясняться тем, что условия, требуемые для образования и возбуждения  $\text{HeH}^+$ , существенно отличаются от таковых для  $\text{CO}$  и  $\text{C}^+$ . Но, конечно, данный результат не может считаться достоверным обнаружением линии и требует подтверждения. Это иллюстрирует сложности такого рода работ (требуется десятки часов накопления сигнала) и в то же время их потенциальные возможности (обнаружение новых молекул, очень важных для понимания химии ранней Вселенной). Ввод в строй интерферометра миллиметрового диапазона длин волн ALMA во много раз сократит требуемое время наблюдений и значительно расширит возможности таких исследований.

## Заключение

Теоретические модели предсказывают существование заметного количества некоторых простых молекул в пострекомбинационной Вселенной до образования первых звезд и галактик. Наблюдения линий данных молекул представляются практически единственным способом как-то исследовать эту недоступную пока для наблюдений эпоху. Согласно некоторым оценкам искажения спектра микроволнового фона, обусловленные этими молекулами, в принципе могут быть зарегистрированы. Имевшие место попытки их обнаружить пока были безрезультатными.

В настоящее время активно идет поиск линий различных молекул в спектрах наиболее далеких галактик, образовавшихся в первые сотни миллионов лет жизни Вселенной. Не считая молекул CO, на красных смещениях  $z > 2$  обнаружены молекулы HCN, HNC, HCO<sup>+</sup>, CN, H<sub>2</sub>O. Возможности таких исследований значительно возрастут с началом полноценной эксплуатации интерферометра ALMA и других проектируемых инструментов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 11-02-12284-офи-м-2011, а также программы ОФН РАН «Активные процессы и стохастические структуры во Вселенной».

## Список библиографических ссылок

1. *Дубрович В. К.* Молекулы космологического происхождения // Письма в Астрон. журн. — 1977. — Vol. 3. — P. 243–245.
2. *Galli D., Palla F.* The chemistry of the early Universe // Astron. Astrophys. — 1998. — Vol. 335. — P. 403–420.
3. *Bovino S., Tacconi M., Gianturco F. A., Galli D.* Ion chemistry in the early universe. Revisiting the role of HeH<sup>+</sup> with new quantum calculations // Astron. Astrophys. — 2011. — Vol. 529. — P. A140.
4. *Vonlanthen P., Rauscher T., Winteler C. et al.* Chemistry of heavy elements in the Dark Ages // Astron. Astrophys. — 2009. — Vol. 503. — P. 47–59. 0906.3701.
5. *Dubrovich V. K.* The huge enhancement of Spectral-Spatial Fluctuations (SSF) in the Cosmic Background Radiation (CBR) // Astron. Astrophys. — 1997. — Vol. 324. — P. 27–31.
6. *Dubrovich V., Bajkova A., Khaikin V. B.* Spectral spatial fluctuations of CMBR: Strategy and concept of the experiment // New Astronomy. — 2008. — Vol. 13. — P. 28–40. 0711.1223.

7. *de Bernardis P., Dubrovich V., Encrenaz P. et al.* Search for LiH lines at high redshift // *Astron. Astrophys.* — 1993. — Vol. 269. — P. 1–6.
8. *Gosachinskiy I. V., Dubrovich V. K., Zhelenkov S. R. et al.* Search for Spatial and Spectral Fluctuations of the Cosmic Microwave Background Radiation Using the RATAN-600 Radio Telescope // *Astronomy Reports.* — 2002. — Vol. 46. — P. 543–550.
9. *Зинченко И. И.* Влияние космической пыли и молекул на спектр реликтового фона // *Письма в Астрон. журн.* — 1979. — Vol. 5. — P. 435–438.
10. *Persson C. M., Maoli R., Encrenaz P. et al.* The first spectral line surveys searching for signals from the dark ages // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 515. — P. A72. 1003.2935.
11. *Nordh H. L., von Schéele F., Frisk U. et al.* The Odin orbital observatory // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 402. — P. L21–L25.
12. *Wagg J., Wilner D. J., Neri R. et al.* HCN  $J = 5-4$  Emission in APM 08279+5255 at  $z = 3.91$  // *Astrophys. J., Lett.* — 2005. — Vol. 634. — P. L13–L16. [arXiv:astro-ph/0510542](#).
13. *Guélin M., Salomé P., Neri R. et al.* Detection of HNC and tentative detection of CN at  $z = 3.9$  // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 462. — P. L45–L48. [arXiv:astro-ph/0612345](#).
14. *Riechers D. A., Walter F., Cox P. et al.* Detection of Emission from the CN Radical in the Cloverleaf Quasar at  $z = 2.56$  // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 666. — P. 778–783. 0705.3338.
15. *Weiß A., Downes D., Neri R. et al.* Highly-excited CO emission in APM 08279+5255 at  $z = 3.9$  // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 467. — P. 955–969. [arXiv:astro-ph/0702669](#).
16. *Riechers D. A., Weiß A., Walter F., Wagg J.* Dense Molecular Gas Excitation in Nuclear Starbursts at High Redshift: HCN, HNC, and  $\text{HCO}^+(J = 6 \rightarrow 5)$  Emission in the  $z = 3.91$  Quasar Host of APM 08279+5255 // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 725. — P. 1032–1039.
17. *Omont A., Neri R., Cox P. et al.* Observation of  $\text{H}_2\text{O}$  in a strongly lensed Herschel-ATLAS source at  $z = 2.3$  // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 530. — P. L3. 1107.4979.
18. *Varshalovich D. A., Ivanchik A. V., Petitjean P. et al.* HD Molecular Lines in an Absorption System at Redshift  $z = 2.3377$  // *Astronomy Letters.* — 2001. — Vol. 27. — P. 683–685.
19. *Ivanchik A. V., Petitjean P., Balashev S. A. et al.* HD molecules at high redshift: the absorption system at  $z = 2.3377$  towards Q 1232 + 082 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2010. — Vol. 404. — P. 1583–1590.

20. *Roberge W., Dalgarno A.* The formation and destruction of  $\text{HeH}/+/\text{ in astrophysical plasmas // Astrophys. J. — 1982. — Vol. 255. — P. 489–496.$
21. *Cecchi-Pestellini C., Dalgarno A.* Emission of  $\text{HeH}(+)$  in nebulae // *Astrophys. J. — 1993. — Vol. 413. — P. 611–618.*
22. *Liu X.-W., Barlow M. J., Dalgarno A. et al.* An ISO Long Wavelength Spectrometer detection of CH in NGC 7027 and an  $\text{HeH}^+$  upper limit // *Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1997. — Vol. 290. — P. L71–L75.*
23. *Zinchenko I., Dubrovich V., Henkel C.* A search for  $\text{HeH}^+$  and CH in a high-redshift quasi-stellar object // *Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2011. — Vol. 415. — P. L78–L80.*
24. *Bertoldi F., Cox P., Neri R. et al.* High-excitation CO in a quasar host galaxy at  $z = 6.42$  // *Astron. Astrophys. — 2003. — Vol. 409. — P. L47–L50. arXiv:astro-ph/0307408.*
25. *Walter F., Bertoldi F., Carilli C. et al.* Molecular gas in the host galaxy of a quasar at redshift  $z = 6.42$  // *Nature. — 2003. — Vol. 424. — P. 406–408. arXiv:astro-ph/0307410.*
26. *Walter F., Carilli C., Bertoldi F. et al.* Resolved Molecular Gas in a Quasar Host Galaxy at Redshift  $z = 6.42$  // *Astrophys. J., Lett. — 2004. — Vol. 615. — P. L17–L20. arXiv:astro-ph/0410229.*
27. *Maiolino R., Cox P., Caselli P. et al.* First detection of  $[\text{CII}]\text{158 } \mu\text{m}$  at high redshift: vigorous star formation in the early universe // *Astron. Astrophys. — 2005. — Vol. 440. — P. L51–L54.*



## ИНДУЦИРОВАННОЕ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕ В ГАЛАКТИКЕ

В лекции дается краткий обзор процессов индуцирования звездообразования в молекулярных облаках нашей Галактики. Основное внимание уделяется процессам, связанным с распространением ионизационных и ударных фронтов, — обжатию излучением и «сбору и сжатию».

Triggering of star formation in the Galaxy is reviewed in this lection. Main topics are radiation implosion and "collect and collapse" processes. These processes are related with distribution of shock and ionization fronts from massive star to molecular cloud.

### Введение

Мы знаем, что звезды образуются в молекулярных облаках. И мы понимаем, что механизмы этого процесса до сих пор не исследованы полностью. Известно, что звезды в облаках образуются не «вдруг», а при выполнении определенных условий (подробную лекцию о процессе звездообразования см. в [1]). Есть такие процессы, которые могут как индуцировать (от англ. *to trigger* — запускать) образование звезд, так и предотвращать его. Все дело в масштабах и энергетике. К этим процессам относятся поглощение молекулярными облаками ультрафиолетового излучения уже образовавшихся звезд и воздействие ударных волн на молекулярный газ. В данной лекции мы рассмотрим только «индуцирующую» сторону этих процессов.

Индуцирование звездообразования происходит на разных масштабах — от рождения звезд в отдельных плотных газопылевых конденсациях вплоть до образования скоплений и целых ОВ-ассоциаций. На разных масштабах процессы индуцирования оказываются разными. Начнем с масштаба отдельных звезд, а затем перейдем к скоплениям.

## Обжatie излучением

Обжatie излучением представляет собой образование звезд в отдельных плотных газопылевых конденсациях (далее — сгустках) под влиянием ультрафиолетового ионизирующего излучения соседних массивных звезд. Начало жизни каждой массивной звезды сопровождается образованием вокруг нее зоны ионизованного водорода (зоны НII). Важно то, что на момент «загорания» массивных звезд плотные сгустки уже существуют в молекулярном облаке. В англоязычной литературе процесс обжatia излучением называется *radiative-driven implosion* (радиационная имплозия). Наблюдаемые в видимом свете темные глобулы кометарной формы, длинные «слоновьи хоботы», «пальцы», «столбы», сгустки с ярко светящимися краями — римами как раз являются объектами, в которых звездообразование индуцировано таким образом. Из-за разницы между давлением горячего ионизованного газа зоны НII и давлением холодного молекулярного газа на границе сгустка он теряет равновесие и начинается сжиматься. Это приводит в конечном итоге к образованию в плотном сгустке звезды. Ударная волна, которая возникает при расширении зоны НII и распространяется прочь от нее, помогает сжимать газопылевые сгустки. Известным примером области звездообразования, в которой действует обжatie излучением являются «Столпы Творения» в туманности M16, которые показаны на рис. 1.

Каковы наблюдательные критерии, по которым можно сделать вывод, что в данной области звездообразования действует именно обжatie излучением?

- Во-первых, наблюдаемые сгустки должны быть с одной или со всех сторон освещены внешним ионизирующим излучением звезд предыдущего поколения. Это хорошо видно на рис. 1.
- Во-вторых, поскольку плотные сгустки не приводятся в движение окружающим ионизованным газом, они наблюдаются непосредственно в направлении на зону ионизованного водорода или даже находятся внутри нее, что также имеет место в M16.

## Процесс «сбора и сжатия»

Но как можно образовать звезды, если никаких «начальных» плотных сгустков в молекулярном облаке не было? Откуда они могут взяться в реальном облаке? Как их получить в теоретических

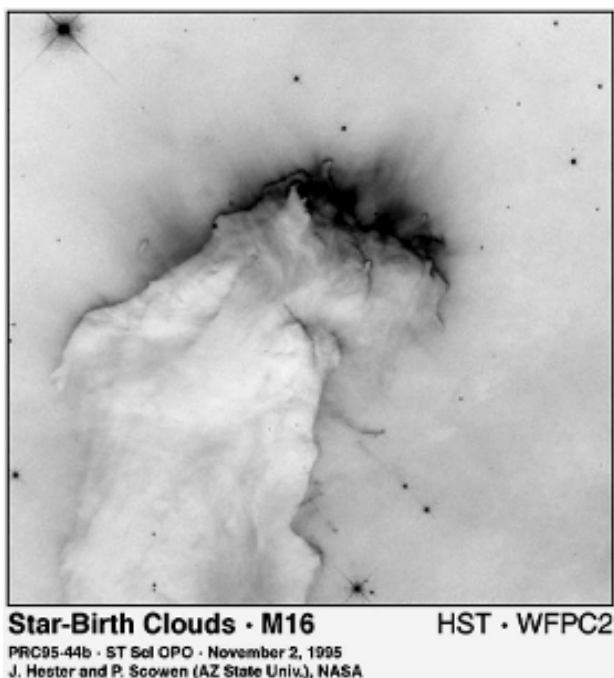


Рис. 1. Один из «Столпов Творения» в туманности M16. Изображение получено космическим телескопом им. Хаббла. Источник изображения NASA / HST. Цвета инвертированы

расчетах и при математическом моделировании? Здесь приходит на помощь другой процесс индуцирования звездообразования. Оказывается, плотные газопылевые конденсации сами могут формироваться из-за воздействия на молекулярные облака ударных волн от расширяющихся зон НП, звездного ветра, остатков сверхновых.

Представим себе молодую массивную звезду в окружающем ее родительском облаке. Вокруг нее быстро образуется зона ионизованного водорода, размер которой все время растет. И даже когда в зоне НП наступит ионизационное равновесие, она продолжит расширяться уже за счет разницы давлений в зоне НП и в ее более холодном окружении. При этом образуется ударная волна (УВ), которая движется по молекулярному облаку быстрее, чем ионизационный фронт (ИФ). Между ними со временем образуется плотная

газовая оболочка. Оболочка движется вместе с УВ в пространстве, непрерывно растут ее размер и ее масса. Затем в оболочке наступают благоприятные условия для развития гравитационной неустойчивости, и в ней образуются крупные плотные конденсации — зародыши целых звездных скоплений. В реальных объектах целой неразрывной оболочки вокруг зоны НП может и не наблюдаться, в этом случае звезды образуются в нескольких отдельных «очагах» вблизи зоны НП (в англоязычной литературе используется слово *ridge* — кромка). Такой процесс индуцирования рождения звезд называется «сбором и сжатием» (от англ. *collect and collapse*). Основная привлекательная черта процесса «сбора и сжатия» для теоретиков и наблюдателей как раз и состоит в том, что ответ на вопрос, откуда берутся плотные сгустки — зародыши будущих звездных скоплений, становится ясен.

Идея процесса «сбора и сжатия» была высказана в работе Элмегрини и Лады в 1977 г. [2], а аналитические расчеты представлены Уитворфом в 1994 г. [3]. Компьютерное моделирование процесса «сбора и сжатия» было проведено Хосокавой и Инутсукой в 2005—2006 гг. [4, 5]. Наблюдательные свидетельства об объектах, где расширение зон НП индуцирует звездообразование в ходе «сбора и сжатия», представлены в серии работ Деарвенг, Заваньо и др. (например, [6–8]).

Интересно, что после запуска космического телескопа им. Спитцера интерес к наблюдениям областей индуцированного звездообразования вокруг зон НП возрос. Анализ изображений галактической плоскости, полученных «Спитцером», в ходе проекта *Spitzer-GLIMPSE* (Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire), в среднем ИК-диапазоне (mid-IR, MIR) обнаружил около 600 так называемых «инфракрасных пузырей» (infrared bubbles, работы Черчвелла и др. [9, 10]). В этих же работах приводятся свидетельства того, что эти пузыри образованы звездами класса О и представителями ранних В-классов. Ватсон и др. [11] показали, что пузыри являются фотодиссоциационными областями (photodissociation region, ФДО) вокруг молодых звезд. ФДО — это область, в которой химические процессы определяются главным образом фотореакциями при поглощении газопылевой средой излучения массивной звезды. ФДО находится между зоной НП и окружающим ее молекулярным облаком. Таким образом, данные «Спитцера» открыли возможность изучать весь спектр процессов, происходящих вокруг зон НП, а также подогрели интерес астрономов к изучению зон НП.

Основное условие для индуцирования звездообразования в «собранной и сжатой» оболочке — это непрерывное аккумулялирование массы газа между УВ и ИФ по мере расширения зоны НП [12]. Когда время аккумулялирования превысит

$$t = \alpha \cdot (G\rho_0\mu)^{-\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

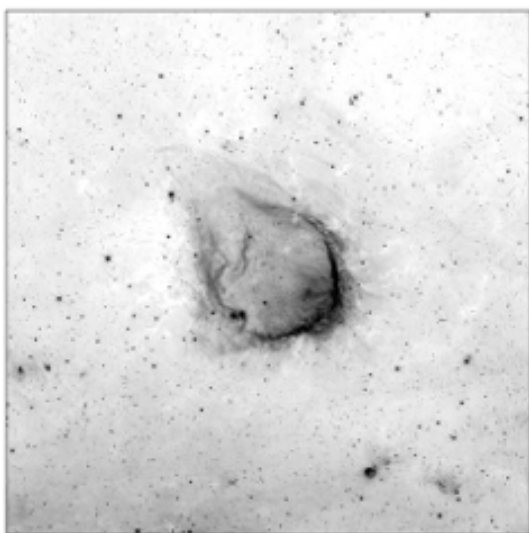
тогда плотная оболочка между УВ и ИФ становится гравитационно неустойчивой, после чего в ней возникают отдельные сгустки — зародыши будущих звездных скоплений. В выражении (1)  $\rho_0$  — начальная плотность газа перед прохождением УВ,  $\mu$  — отношение скорости УВ к скорости звука в плотном газовом слое, коэффициент  $\alpha$  зависит от геометрии задачи, он порядка единицы. Множитель  $\mu$  включает в себе все, что связано с кинематической неустойчивостью и хаотическим движением в оболочке. Данное условие для звездообразования во вновь образовавшихся сгустках учитывает самогравитацию в оболочке, давление газа и тот факт, что плотная оболочка расширяется вместе с зоной НП. Кроме выполнения условия (1) «собранная» оболочка между УВ и ИФ должна быть оптически толстой, чтобы стать холодной и плотной ( $\mu$  растет,  $t$  уменьшается). Это условие выполняется для лучевой концентрации газа  $N > 10^{21} \times \times (Z_{sun}/Z) \text{ см}^{-2}$ . Ясно также, что чем меньшей была плотность газа в момент начала расширения зоны НП, тем большее время понадобится для выполнения в «собранной» оболочке условия (1). Кроме того, радиус «собранной» оболочки  $R_{sf}$  будет при этом больше, поскольку  $R_{sf} \sim n_0^{-\frac{1}{2}}$  [12]. Например, если начальная концентрация частиц в облаке  $n_0$  была порядка  $1 \text{ см}^{-3}$ , тогда  $R_{sf} = 100\text{--}200 \text{ пк}$ , а если  $n_0 = 10^3 \text{ см}^{-3}$ , тогда  $R_{sf}$  будет примерно в 30 раз меньше.

Элмегрин и Лада в 1977 г. показали, что результатом действия процесса «сбора и сжатия» является рождение звездных скоплений [2, 12]. Группа французских наблюдателей под руководством Деарвенга задались вопросом возможно ли образование массивных звезд в результате процесса «сбора и сжатия». Да и возможно ли отличить, как именно происходило индуцирование звездообразования в окрестности отдельной зоны НП — было ли это обжатие излучением уже существующих плотных газопылевых сгустков или же имел место процесс «сбора и сжатия»? Они создали выборку объектов, основываясь на данных «Спитцера», которые настолько просты морфологически, что позволяют создать наблюдательные критерии «сбора и сжатия».

- Во-первых, вокруг зоны НП должна наблюдаться оболочка нейтрального плотного газа. Оболочка не обязательно должна быть неразрывной и идеально ровной, но может состоять из отдельных фрагментов-кромek или очагов. Оболочка должна наблюдаться по линиям излучения молекул (в основном это молекула окиси углерода CO). Также должна наблюдаться ФДО по непрерывному излучению пыли и полиароматических углеводородов в ИК-диапазоне.
- Во-вторых, положения молодых звездных объектов, погруженных в плотные газовые сгустки и видимых на ИК-изображениях «Спитцера», должны совпадать с направлением на нейтральную оболочку.
- В-третьих, сгустки должны располагаться «по-соседству» с ИФ.
- В-четвертых, оценки возраста молодых звездных объектов в плотных газовых сгустках должны соответствовать оценке возраста звезды, породившей зону НП и предполагаемому возрасту самой зоны НП.

Эти критерии показали свою эффективность для исследования зон НП. Были исследованы несколько областей индуцированного звездообразования, оценены массы, лучевые скорости звезд, возраст образовавшихся звезд и самих зон НП. Было установлено, что массы звезд последующего поколения меньше, чем звезды, породившей зону НП, а наиболее массивная звезда, образованная в результате процесса «сбора и сжатия» имеет спектральный класс O8 [13], чему соответствует масса в  $22 M_{\odot}$ . Красивым примером зоны НП и индуцированного звездообразования в результате «сбора и сжатия» является практически сферически-симметричный объект RCW 120 [8]. Астрономами Коуровской обсерватории были получены данные о том, что расширение RCW 120 индуцировало образование плотного сгустка с погруженным массивным звездным объектом, масса которого оценивается в  $6.3 M_{\odot}$  [14], что соответствует звезде спектрального класса V3—V4. ФДО этой зоны НП показано на рис. 3.

При наблюдении области звездообразования зачастую сложно сказать, какой именно процесс индуцирования «сработал» в том или ином случае. Но сегодня известно, что обжатие уже существующих плотных сгустков, так же как и процесс «сбора и сжатия», может происходить вблизи одной и той же зоны НП. Пример — область звездообразования RCW 79 [15], в которой наблюдаются как яркие



Milky Way Ring RCW 120  
 Spitzer Space Telescope • IRAC • MIPS  
 NASA / JPL-Caltech sg11-007

Рис. 2. Зона НII RCW 120 в ИК-лучах. Изображение, полученное «Спитцером», составлено из трех: 3,6, 8 и 24 мкм. На изображении видна ФДО этой зоны ионизованного водорода. Вокруг зоны НII наблюдаются радиоизлучение плотной оболочки и молодые звездные скопления (на рисунке не показано). Газовая оболочка вокруг RCW 120 — идеальный кандидат «собранные и сжатые». Источник изображения NASA / JPL—Caltech. Цвета инвертированы

римы, так и плотный «собранный и сжатый» газовый слой, в котором есть более крупные и массивные звездные объекты.

Другой пример — область звездообразования вблизи зоны ионизованного водорода S235. Эта зона НII находится в гигантском молекулярном облаке, вместе с ней там наблюдаются еще несколько зон НII, но молодые звездные скопления обнаружены вблизи S235 [16]. Было показано, что образование как минимум трех скоплений было индуцировано расширением S235. Эти скопления погружены в родительский газ, который распределен очень неоднородно. Плотная оболочка вокруг S235 «разорвана» и почти отсутствует с одной стороны от зоны НII. Одно из погруженных молодых звездных скоплений, по видимому, находится на более ранней стадии формирования, чем два

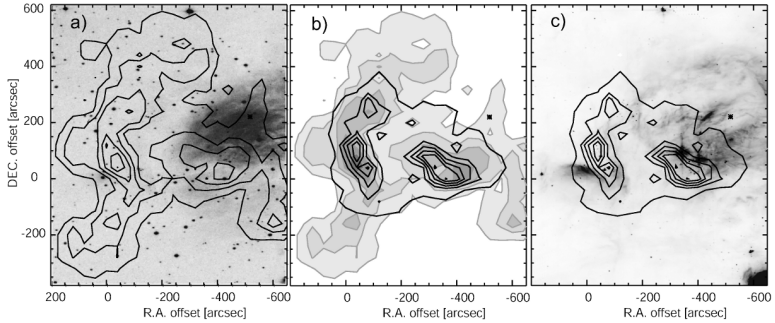


Рис. 3. Область звездообразования S235. На панели «а» показана плотная молекулярная оболочка в радиолинии  $^{13}\text{CO}(1-0)$  (черные контуры) на фоне оптического изображения зоны НII из архива «Цифрового обзора неба» DSS (красный фильтр). Панель «b» — излучение  $^{13}\text{CO}(1-0)$  (оттенки серого) и более плотный газ в линии CS(2-1) (черные контуры). В газовой оболочке находятся три плотных сгустка. В них образовались звездные скопления следующего поколения. Панель «с» — та же оболочка в линии CS(2-1), на фоне — изображение ФДО, полученное «Спитцером», длина волны 8 мкм. Начало координат  $\alpha(J2000.0) = 05^{\text{h}}41^{\text{m}}33.8^{\text{s}}$ ,  $\delta(J2000.0) = +35^{\circ}48'27''$ . Скопление, погруженное в сгусток в направлении начала координат, по-видимому, моложе, чем два других. Звезда, породившая зону НII, отмечена звездочкой, ее спектральный класс O9.5 (рисунок из работы [16])

других. Это, вообще говоря, не ожидается в процессе «сбора и сжатия». Поэтому в области звездообразования S235 нельзя исключить как этот процесс, так и обжигание предварительно сформированных плотных сгустков.

## Столкновения молекулярных облаков

Образование плотного «собранного и сжатого» слоя газа возможно не только в окрестности зон НII, но и при столкновении молекулярных облаков. Показать по результатам наблюдений, что в данной области звездообразования происходит столкновение облаков, очень сложно, поскольку время, проведенное облаком при столкновении, невелико — для диффузного облака составляет менее 10 % от его жизни, а для плотного оно менее 1 % [12]. Хотя в случае попадания облака в спиральную волну плотности столкновения с другими об-



лаками могут случаться чаще. Поэтому явление столкновения облаков чаще исследуется численно. Большое количество расчетов этой задачи показали, что если в облаках перед столкновением уже есть плотные сгустки, то звездообразование в предварительно сформированных сгустках происходит в очень широких границах параметров задачи. Так где же снова взять начальные «неоднородности» в реальных облаках? Идея о том, что поставщиком «неоднородностей» является межзвездная турбулентность, помогла ответить на этот вопрос. Было показано, что образование звезд может происходить даже без наличия «начальных неоднородностей», если в межзвездных облаках есть турбулентные движения [12, 17, 18]. Плотные сгустки и будущие звезды образуются в местах столкновений турбулентных потоков. Рассматривая межзвездные облака как турбулентные объекты, теоретики смогли объяснить, почему облака имеют иерархическую структуру, почему звезды образуются в скоплениях и ассоциациях, а также некоторые другие вопросы, поставленные наблюдателями.

## Заключение

Сегодня тема индуцированного звездообразования под воздействием ионизационных и ударных фронтов весьма популярна. Два основных процесса — «сбор и сжатие» плотной оболочки вблизи зоны НП и обжигание излучением уже существующих плотных сгустков — действуют в окрестности молодых массивных звезд. Показано, что звезды последующего поколения менее массивны, чем предыдущего. Есть работы, в которых последовательное индуцирование звездообразования прослеживается даже более чем для двух поколений звезд, как, например, в ОБ-ассоциации Скорпиона-Центавра [19].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-02-00612 и 11-02-01332. Автор выражает благодарность С. Н. Замоздре за ценные комментарии.

## Список библиографических ссылок

1. Виле Д. З. Откуда берутся звезды // Физика космоса : Тр. 35-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 30 янв. — 3 февр. 2006 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2006. — С. 39.
2. Elmegreen B. G., Lada C. J. Sequential formation of subgroups in OB associations // Astrophys. J. — 1977. — Vol. 214. — P. 725–741.

3. *Whitworth A. P., Bhattal A. S., Chapman S. J. et al.* The Preferential Formation of High-Mass Stars in Shocked Interstellar Gas Layers // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1994. — Vol. 268. — P. 291–298.
4. *Hosokawa T., Inutsuka S.-i.* Dynamical Expansion of Ionization and Dissociation Fronts around a Massive Star. I. A Mode of Triggered Star Formation // *Astrophys. J.* — 2005. — Vol. 623. — P. 917–921. [arXiv:astro-ph/0411080](#).
5. *Hosokawa T., Inutsuka S.-i.* Dynamical Expansion of Ionization and Dissociation Front around a Massive Star. II. On the Generality of Triggered Star Formation // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 646. — P. 240–257.
6. *Deharveng L., Zavagno A., Caplan J.* Triggered massive-star formation on the borders of Galactic H II regions. I. A search for «collect and collapse» candidates // *Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 433. — P. 565–577.
7. *Zavagno A., Deharveng L., Comerón F. et al.* Triggered massive-star formation on the borders of Galactic H II regions. II. Evidence for the collect and collapse process around RCW 79 // *Astron. Astrophys.* — 2006. — Vol. 446. — P. 171–184.
8. *Zavagno A., Pomarès M., Deharveng L. et al.* Triggered star formation on the borders of the Galactic H II region RCW 120 // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 472. — P. 835–846.
9. *Churchwell E., Povich M. S., Allen D. et al.* The Bubbling Galactic Disk // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 649. — P. 759–778.
10. *Churchwell E., Watson D. F., Povich M. S. et al.* The Bubbling Galactic Disk. II. The Inner 20 deg // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 670. — P. 428–441.
11. *Watson C., Povich M. S., Churchwell E. B. et al.* Infrared Dust Bubbles: Probing the Detailed Structure and Young Massive Stellar Populations of Galactic H II Regions // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 681. — P. 1341–1355.
12. *Elmegreen B. G.* Observations and Theory of Dynamical Triggers for Star Formation // *Origins* / Ed. by C. E. Woodward, J. M. Shull & H. A. Thronson Jr. : ASP Conf. Ser. — 1998. — Vol. 148. — P. 150–+. [arXiv:astro-ph/9712352](#).
13. *Deharveng L., Zavagno A.* Massive star formation triggered by galactic HII regions // *Massive star formation: observations confront theory* / Ed. by H. Beuther, H. Linz, H. T. : ASP Conference Series, Proc. conf., Heidelberg, Germany, 10–14 Sept. 2007. — 2008. — Vol. 387. — P. 338–345.
14. *Salii S. V., Sobolev A. M., Kirsanova M. S.* Estimation of physical parameters for Condensation 1 in RCW 120 using APEX observation of methanol radiolines // *Book of Abstracts : European Week of Astronomy*

- and Space Science (JENAM 2011). — Saint-Petersburg 4–8 July 2011 : 2011. — P. 167.
15. *Zavagno A., Deharveng L., Comerón F. et al.* Triggered massive-star formation on the borders of Galactic H II regions. II. Evidence for the collect and collapse process around RCW 79 // *Astron. Astrophys.* — 2006. — Vol. 446. — P. 171–184. **arXiv:astro-ph/0509289**.
  16. *Kirsanova M. S., Sobolev A. M., Thomasson M. et al.* Star formation around the HII region Sh2-235 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2008. — Vol. 388. — P. 729–736. **0805.1586**.
  17. *Mac Low M.-M., Klessen R. S.* Control of star formation by supersonic turbulence // *Rev. Mod. Phys.* — 2004. — Vol. 76. — P. 125–194. **arXiv:astro-ph/0301093**.
  18. *Elmegreen B. G.* Conference summary: triggered star formation in a turbulent ISM // *Proc. IAU Symp* / Ed. by B. G. Elmegreen & J. Palous : *Proc. IAU Symp.* — 2007. — Vol. 237. — P. 384–389.
  19. *Preibisch T., Zinnecker H.* Sequentially triggered star formation in OB associations // *Proc. IAU Symp* / Ed. by B. G. Elmegreen & J. Palous : *Proc. IAU Symp.* — 2007. — Vol. 237. — P. 270–277.

## МЕЖДУНАРОДНАЯ ВИРТУАЛЬНАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ: ИТОГИ ПЕРВОГО ДЕСЯТИЛЕТИЯ

Международная виртуальная обсерватория представляет собой мощную виртуальную среду, предназначенную для увеличения возможностей астрономических исследований и научного выхода данных. Виртуальная обсерватория интегрирует в единую систему гигантские астрономические архивы и базы данных, распределенные по всему миру, а также инструменты анализа данных и вычислительный сервис, используя при этом набор однородных стандартов и технологий. Международная виртуальная обсерватория включает в себя все значительные национальные и международные проекты по созданию виртуальных обсерваторий, основная цель которых — объединить существующие архивы наземных и космических инструментов и обеспечить исследователям и общественности удобный доступ к ним. Эта задача представляется чрезвычайно важной не только из-за колоссального объема астрономических данных, но и их спектрального разнообразия (от рентгена до радио). Каждый спектральный диапазон предоставляет свою, уникальную информацию о небесном объекте или явлении; при этом требуется специализированная экспертиза для правильной интерпретации. Вся эта информация также интегрируется в Международной виртуальной обсерватории и позволяет синтезировать данные, чтобы использовать их в конкретных научных приложениях.

Набор однородных стандартов и технологий, необходимый для успешного функционирования виртуальной обсерватории, разрабатывает, внедряет и поддерживает Альянс «Международная Виртуальная обсерватория» — международный союз национальных обсерваторий, призванный координировать деятельность по стандартизации описания, поиска, доступа и публикации данных. Одним из основателей и активным участником Альянса является Российская виртуальная обсерватория.

Проект «Международная виртуальная обсерватория» появился около десяти лет назад, основные его достижения в науке и технологии обсуждаются в настоящей статье.

International Virtual Observatory is a collection of integrated astronomical data archives and software tools that utilize computer networks to create an environment in which research can be conducted. Several countries have initiated national virtual observatory programs that will combine existing databases from ground-based and space-born observatories and make them easily accessible to researchers. As a result, data from all the world's major observatories will be available to all users and to the public. This is significant not only because of the immense volume of astronomical data but also because the data on stars and galaxies have been compiled from observations in a variety of wavelengths: optical, radio, infrared, gamma ray, X-ray and more. Each wavelength can provide different information about a celestial event or object, but also requires a special expertise to interpret. In a virtual observatory environment, all of this data is integrated so that it can be synthesized and used in a given study.

The International Virtual Observatory Alliance (IVOA) represents 20 national and international projects working in coordination to realize the essential technologies and interoperability standards necessary to create a new research infrastructure. Russian Virtual Observatory is one of the founders and important members of the IVOA.

The International Virtual Observatory project was launched about ten years ago, and its major achievements in science and technology in recent years are discussed in this paper. Standards for accessing large astronomical data sets were developed. Such data sets can accommodate the full range of wavelengths and observational techniques for all types of astronomical data: catalogues, images, spectra and time series. The described standards include standards for metadata, data formats, query language, etc. Services for the federation of massive, distributed data sets, regardless of the wavelength, resolution and type of data were developed. Effective mechanisms for publishing huge data sets and data products, as well as data analysis toolkits and services are provided. The services include source extraction, parameter measurements and classification from data bases, data mining from image, spectra and catalogue domains, multivariate statistical tools and multidimensional visualization techniques. Development of prototype virtual observatory services and capabilities implemented within the existing data centers, surveys and observatories are also discussed.

We show that the International Virtual Observatory has evolved beyond the demonstration level to become a real research tool. Scientific results based on end-to-end use of virtual observatory tools are discussed in the paper.

## Международная виртуальная обсерватория

В связи со значительными достижениями в наблюдательных, регистрирующих и вычислительных технологиях астрономия в конце прошлого века столкнулась с лавинообразным увеличением количества получаемых данных. Эти наборы данных покрывают небо в различных диапазонах длин волн, от гамма- и рентгеновского диапазона, через ультрафиолетовый, оптический и инфракрасный, до радиодиапазона. Для решения многих астрофизических задач накопленного сейчас наблюдательного материала уже достаточно. С учетом появления недорогих технологий хранения данных и наличия высокоскоростных сетей концепция мультитерабайтных, бесшовных интероперабельных баз данных уже не является надуманной. Все большее количество астрономических каталогов становятся взаимосвязанными, поисковые машины все более и более усложняются, а результаты анализа таких данных становятся столь же богатыми, как и для данных, полученных с реальных телескопов. Предназначенные для обзоров телескопы наземного и космического базирования могут поставлять изображение всего неба за несколько дней и производить, таким образом, данные в объемах, измеряемых в петабайтах. Эти технологические достижения фундаментально изменяют характер астрономических исследований, а эти изменения радикально влияют на социологию самой астрономии.

За прошедшие годы концепция Виртуальной обсерватории (ВО, Virtual Observatory, VO), призванная удовлетворить существующим требованиям к управлению данными, их анализу и распространению, завоевала широкую популярность. ВО — это система, в которой распределенные по всему миру гигантские астрономические архивы и базы данных интегрированы в единую среду вместе с инструментами анализа данных и вычислительным сервисом. Современная астрономия стоит у границ новых открытий, возможности которых предоставляются современными информационными технологиями, а также политической и технической международной кооперацией.

Необходимо отметить, что Виртуальная обсерватория является эффективным инструментом демократизации астрономии, поскольку даже небольшие научные, а также образовательные астрономические учреждения получают по существу те же возможности для проведения научных исследований на современном наблюдательном материале, что и ведущие астрономические организации мира.

Собственно Виртуальная обсерватория представляет собой реализацию концепции электронной науки в астрономии; это мощная виртуальная среда, предназначенная для увеличения возможностей астрономических исследований и научного выхода данных. Говоря упрощенно, увеличение научного выхода данных означает получение большего количества научных результатов (например, опубликованных статей или представленных докладов на конференциях) с каждого гигабайта данных, приходящих с данного конкретного инструмента. Это в конечном счете означает увеличение влияния каждого гигабайта данных на общее развитие науки — точно так же, как публикация научной работы помимо журнала еще и на сервере препринтов увеличивает ее влияние и роль в отрасли.

В традиционном подходе к научной работе львиная доля времени и усилий исследователя затрачивается на разнообразные низкоуровневые операции: конвертацию форматов, редукцию данных и подготовку их к научному анализу, поиск информации, написание сценариев автоматизированной обработки для многократных операций и другие действия. Их повторное использование зачастую ограничено или вовсе не представляется возможным. При этом собственно интеллектуальные усилия, анализ и интерпретация подготовленного научного материала, имеющие решающее значение во всем процессе, занимают несравнимо меньшее время. Миссией Виртуальной обсерватории в широком смысле является разделение творческого, интеллектуального, высокоуровневого процесса от низкоуровневых операций, которые должны либо происходить прозрачно (незаметно) для исследователя, либо быть максимально пригодными для повторного использования в ходе работы над последующими научными задачами. Таким образом, на первое место выходят абстрагированные от конкретных инструментов и наблюдателей данные, готовые к научному использованию, сервисы для доступа к ним и широкий набор соглашений для обеспечения прозрачности рутинных операций. Всем этим в той или иной степени занимается Виртуальная обсерватория. Ее успехи к настоящему моменту и само текущее положение дел уже несет в себе новые возможности для эффективных научных исследований, обходящихся без рутинной низкоуровневой составляющей.

К настоящему времени в мире функционируют 20 национальных и международных проектов Виртуальных обсерваторий. Их осуществление не лимитируется национальными границами. В проектах используются наблюдательные данные в широком диапазоне длин

волн, полученные с космических и наземных инструментов, используемых международным астрономическим сообществом. Цель каждого проекта — вооружить астрономов мощными механизмами современного исследования данных наблюдений, механизмами, которые могут быть использованы и коллегами из смежных наук.

Для того чтобы Международная виртуальная обсерватория (МВО) стала реальностью, необходимо определить ее задачи и шаги, требующиеся для их достижения, как координируемые международные усилия. Каждый из существующих национальных проектов имеет собственные научные и технологические задачи. В то время как это разнообразие представляется достаточно благоприятным для успеха МВО, существуют также некоторые общие элементы, которые необходимо согласовывать для эффективного конструирования МВО. Большинство таких общих элементов связано со стандартами данных и интерфейсов. Другой вид общих (или используемых совместно) элементов — это пакеты программ и библиотеки исходных текстов. Еще один пример целесообразности международного сотрудничества — проблемы безопасности, финансирование, политические вопросы. На достаточно ранних этапах создания МВО должны быть решены вопросы стандартов интероперабельности используемых источников данных. Чрезвычайно целесообразными для приобретения доверия широких слоев астрономического сообщества представляются демонстрации новых возможностей виртуальных обсерваторий на различных уровнях сложности. Необходимо предоставить возможности для открытого обмена информацией и опытом между различными ВО проектами. Следовательно, требуется разработать прозрачный для сообщества путь к созданию МВО. Некоторые цели на этом пути уже достигнуты, другие будут достигнуты в ближайшем будущем. ВО сообщество, таким образом, потребовало механизма для облегчения международного сотрудничества в деле достижения общих целей.

В качестве такого механизма выступил Альянс «Международная виртуальная обсерватория» (International Virtual Observatory Alliance, IVOA, <http://ivoa.net>), созданный в 2001 г. Альянс включает в себя представителей всех финансируемых ВО проектов, которые встречаются и общаются на регулярной основе для согласования решений по общим проблемам и достижения консенсуса при выработке общего базиса, без чего МВО не сможет функционировать. Совещания Альянса происходят два раза в год, кроме того, еще два раза в год осуществляются телеконференции.



Виртуальную обсерваторию иногда называют всемирной сетью (World Wide Web, WWW) для астрономов. В самом деле, между ними существует значительное сходство.

- Неотделимой частью обеих концепций являются ресурсы. В случае WWW в качестве ресурсов выступают (1) веб-сайты; (2) порталы и директории; (3) веб-сервисы. В Виртуальной обсерватории на их месте стоят (1) архивы данных; (2) сервисы доступа к каталогам (например, SDSS); (3) астрономические веб-сервисы.
- Еще одним краеугольным камнем в основании VO и WWW являются инструменты доступа к ресурсам: (1) в WWW мы имеем веб-браузеры (например, Internet Explorer, Firefox, Safari), тогда как в VO вместо них используются браузеры данных (например, astrogrid vo desktop, cds aladin, nvo datascope); (2) искушенные пользователи достаточно часто используют средства для работы с ресурсами из командной строки — curl или wget в WWW и аналогично stils или astro-runtime в VO; (3) наконец, существуют специализированные клиенты, которые используют WWW/VO-протоколы в качестве инфраструктуры и/или передачи данных: Picasa и Google earth и их аналоги в VO, например, Visivo.
- IVOA играет ту же самую роль для VO, что и W3C (World Wide Web Consortium, консорциум Всемирной сети) для WWW: это административные организации, ответственные за разработку и внедрение стандартов обмена различными видами информации между сторонами-участниками соответствующих процессов. В качестве примеров в данном случае можно привести спецификации HTML/XHTML, разработанные W3C, и стандарт VOTable, разработанный IVOA.

В последние годы Виртуальная обсерватория достигла существенного прогресса. Рабочими группами IVOA разработан достаточно широкий набор стандартов, которые охватывают

- форматы данных (VOTable),
- описания метаданных ресурсов (Resource Metadata),
- модель данных для одномерных спектров (Spectrum Data Model) и значительно более сложную и емкую Characterisation Data Model,
- язык запросов к данным (ADQL),

- протоколы доступа к спектрам и изображениям (SIAP, SSAP),
- протокол коммуникаций между различными приложениями на рабочей станции пользователя (SAMP),
- механизмы аутентификации и авторизации
- и другие.

Кроме того, на разных стадиях разработки находится еще ряд стандартов. К настоящему моменту в Виртуальной обсерватории стало возможным работать даже с чрезвычайно сложными наборами данных — например, с 3D-спектроскопией и результатами N-body симуляций. В то же самое время разработчики приложений создали впечатляющий набор VO-инструментов, начиная с самых общих и заканчивая узкоспециализированными клиентскими средствами.

Поставщики данных и сервисов внесли свой вклад в VO, предоставляя доступ к огромным коллекциям и архивам данных в диапазоне длин волн от радио до гамма. Совсем недавно стали появляться сервисы доступа к теоретическим моделям (например, коллекция теоретических спектров звездных атмосфер в Spanish-VO или синтетические модели звездных популяций PEGASE в VO-France, доступ к результатам космологических симуляций в Italian VO). Также нельзя не упомянуть первые прототипы сервисов для анализа данных и научно-значимых сервисов, ассоциированных с архивами данных, например моделирование спектрофотометрических свойств взаимодействующих галактик в базе данных GalMer.

После нескольких лет интенсивного технологического развития ресурсы Виртуальной обсерватории достигли уровня зрелости, достаточного для их каждодневного использования в научных исследованиях. Виртуальная обсерватория находится на той стадии развития, когда астрономы начинают прозрачно для себя использовать ее в рутинной научной работе. Краткий обзор новейших исследований [1] с применением Виртуальной обсерватории свидетельствует о ее готовности к более широкому использованию. В ближайшее время появятся работы, эксплуатирующие VO на качественно более сложном уровне, с применением более уточненных и общих моделей данных и технологических достижений.

## Российская виртуальная обсерватория

Виртуальные обсерватории начали создаваться в разных странах с 2000 г., одной из первых была Российская виртуальная обсерватория (РВО). Инициаторами создания РВО стали Центр астрономических данных Института астрономии РАН и Специальная астрофизическая обсерватория РАН. В настоящее время проект РВО осуществляется на основе Соглашения, подписанного директорами Института астрономии РАН, Института проблем информатики РАН, Государственного астрономического института имени Штернберга МГУ и Специальной астрофизической обсерватории РАН.

Научный совет по астрономии Отделения физических наук Российской академии наук в декабре 2001 г. одобрил инициативу создания Российской виртуальной обсерватории, конечной целью которой является обеспечение российским астрономам доступа к обширным источникам данных и метаданных, создаваемых в результате работы наблюдательных проектов. Работы по созданию РВО являются важнейшей частью плана научно-исследовательских работ Секции 13 «Базы данных и информационное обеспечение» Научного совета по астрономии ОФН РАН.

Актуальность создания РВО определяется в первую очередь тем, что с распадом СССР российская астрономия практически лишилась инструментальной базы — обсерваторий на юге СССР. Весьма затруднена или вообще оказалась невозможной научная работа в Абастуманской астрофизической обсерватории в Грузии, Шемахинской обсерватории в Азербайджане, Майданакской обсерватории в Узбекистане. Закрыты наблюдательная станция Санкт-Петербургского университета в Бюракане, станция Шорбулак Главной астрономической обсерватории на Памире; туманны перспективы, ожидающие Крымскую астрофизическую обсерваторию — бывшую лучшую обсерваторию Советского Союза. Оставшаяся в России Специальная астрофизическая обсерватория на Северном Кавказе не в состоянии полностью обеспечить наблюдательные потребности столичных и региональных астрономических учреждений. Оптимальным выходом из сложившейся ситуации является интеграция российского астрономического сообщества в мировую информационную сеть астрономических данных, прежде всего в западные наблюдательные архивы.

Вклад РВО в задачу объединения мировых астрономических ресурсов может быть весьма значительным. В России действует около 30 астрономических институтов и организаций, многие из которых располагают обширными архивами данных и сотрудничают в создании РВО. Одним из преимуществ российских астрономических данных является возможность создания объединенных с данными обсерваторий других стран продолжительных рядов наблюдений. Это обусловлено тем, что многие обсерватории в России, которая занимает 9 часовых поясов по долготе и простирается до почти сороковой параллели по широте, расположены на противоположной относительно большинства крупных мировых обсерваторий стороне земного шара.

Основными целями Проекта РВО являются предоставление российскому астрономическому сообществу удобного и эффективного механизма доступа к зарубежным источникам данных и объединение российских астрономических информационных ресурсов как важного компонента для интеграции в Международную виртуальную обсерваторию [2].

Для предоставления российским астрономам удобного доступа к зарубежным источникам данных в Центре астрономических данных (ЦАД) ИНАСАН размещен ряд зеркал известных зарубежных баз данных и поддерживается их функционирование (ADS, VizieR, VALD). Планируется зеркалировать в ЦАД другие популярные зарубежные астрономические информационные ресурсы, в том числе важнейшую базу звездных данных SIMBAD. В ближайшее время в ЦАД будет размещена База данных о двойных звездах BDB. Предусмотрено также зеркалирование в ЦАД некоторых популярных российских астрономических информационных ресурсов, доступ к которым на месте их создания по каким-либо причинам затруднен.

ЦАД также предоставляет доступ к астрономическим off-line ресурсам, так как в фондах Центра имеется коллекция компакт-дисков, издаваемых, преимущественно ведущими западными обсерваториями и содержащих астрономические каталоги, базы данных, архивы изображений и другие виды ресурсов, а также вычислительные средства работы с данными.

Проблема интеграции и предоставления зарубежному сообществу исчерпывающего описания формы и содержания российских астрономических информационных ресурсов, выполненных по стандартам Международной виртуальной обсерватории, также решается в рамках информационной системы ЦАД. В частности, завершена работа

по созданию структурированного перечня российских (и ряда стран бывшего СССР) астрономических Интернет-ресурсов, ряда ресурсов, предоставляемых в режиме off-line, и ресурсов, находящихся в стадии разработки [3]. Ведется обработка, проверка и передача в Страсбургский центр данных таблиц данных из статей, опубликованных в русских астрономических журналах, и звездных каталогов, подготавливаемых в российских астрономических организациях; создаются англоязычные машиночитаемые версии опубликованных российских каталогов, а также осуществляется консультативная помощь авторам при подготовке каталогов. Создан исчерпывающий двуязычный список российских астрономических учреждений. В список также включены некоторые астрономические организации стран бывшего СССР. Планируется модернизация этого списка с целью облегчения доступа к информации об организациях как отечественным, так и зарубежным пользователям.

В Институте проблем информатики (ИПИ) РАН реализована архитектура промежуточного слоя предметных посредников для решения научных задач над множеством интегрируемых неоднородных распределенных информационных ресурсов в гибридной грид-инфраструктуре. Архитектура реализована как объединение системы поддержки Виртуальных обсерваторий АстроГрид, разработанной в Великобритании, и средств поддержки предметных посредников, созданных в ИПИ РАН. Реализован подход, при котором для класса приложений определяется спецификация соответствующей этому классу предметной области независимо от существующих информационных ресурсов. Существенно, что такая спецификация одновременно является концептуальной схемой посредников, обеспечивающих взаимодействие приложений с конкретными информационными ресурсами. Создание прототипа гибридной архитектуры потребовало сопряжения исполнительных механизмов двух инфраструктур (АстроГрида и средств поддержки предметных посредников), разработки средств переписывания запросов к посредникам в планы их реализации над конкретными информационными ресурсами, создания адаптеров для сопряжения конкретных информационных ресурсов с посредниками. Также для указанной инфраструктуры разработан прототип средств Унификатора информационных моделей, позволяющий создавать расширяемую каноническую информационную модель, применяя автоматизированные средства приведения различных моделей ресурсов (структурированных, объектных, процессных, онтологических) к канонической модели.

Проблема эффективного комплексного использования нескольких астрономических ресурсов с помощью создания посредников, которые поддерживают взаимодействие между исследователем и соответствующими источниками данных и сервисов для данного класса задач, решалась в Специальной астрофизической обсерватории (САО) РАН. Основной задачей проекта «Большое Трио», осуществляемого в САО РАН, является анализ источников радиоизлучения в области неба, исследованной в глубоком обзоре с телескопом РАТАН-600 в 1980 г., с целью получения максимальной информации об источниках. Применение для этой цели предметного посредника описано в [4].

В течение ближайших лет в рамках проекта «Российская виртуальная обсерватория» предполагается осуществить оцифровку фотографических пластинок, накопленных в российских обсерваториях (и некоторых обсерваториях СНГ). В настоящее время работа ведется совместными усилиями ИНАСАН и ГАИШ. Аналогичная работа проводится в обсерваториях Болгарии, Венгрии и Германии. Сканы заносятся в базу данных, разработанную в Астрономическом институте Болгарской академии наук. Работы по сохранению информации стеклянных библиотек выполняются под эгидой Международного астрономического союза.

Результаты деятельности по проекту РВО отражены на постоянно обновляющемся веб-сайте РВО <http://www.inasan.rssi.ru/rus/rvo>.

## Заключение

Традиционная парадигма открытий астрономических объектов подразумевает изобретение, создание и использование новых телескопов и наблюдательных методов. Виртуальная обсерватория позволяет видоизменить эту концепцию, поскольку для новых открытий используются существующие данные из архивов и каталогов. Основная трудность подобного подхода заключается в том, что объем публикуемых данных начинает существенно превосходить возможности их обработки любыми стандартными методами. Системы автоматического поиска и анализа имеющихся в публичном пространстве данных, которые предоставляет Виртуальная обсерватория, являются единственным выходом из сложившейся ситуации.

Создание первой очереди Международной виртуальной обсерватории предполагается закончить в ближайшее время. В результате

осуществления этого проекта российские астрономы смогут с помощью средств Российской виртуальной обсерватории получить всю доступную в данное время в мире информацию для интересующих их объектов. Виртуальная обсерватория переросла «демонстрационный» уровень и стала реальным исследовательским инструментом. В дальнейшем Международная виртуальная обсерватория будет пополняться новыми данными и сервисами, позволяющими решать актуальные научные проблемы

Мы благодарим наших коллег по проекту «Российская виртуальная обсерватория» за постоянную помощь и сотрудничество.

Работа поддержана грантами РФФИ 09-02-00520, 10-02-00426, 10-07-00342, программой «Научные школы» (НШ-4354.2008.2), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг. (контракт П1195), а также Федеральным агентством по науке и инновациям (02.740.11.0247).

## Список библиографических ссылок

1. Малков О. Ю., Длужневская О. Б., Бартунов О. С., Золотухин И. Ю. Международная виртуальная обсерватория — 10 лет спустя // Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции : Тр. XII Всерос. науч. конф. RCDL'2010, Казань, 13—17 окт. 2010 г. — Казань : Издат.-полиграф. центр Казан. федерал. ун-та, 2010. — С. 45—52.
2. Длужневская О. Б., Малков О. Ю. // Астрон. журн. — 2005. — Vol. 82. — P. 1148—1152.
3. Ковалева Д. А., Длужневская О. Б. Российские ресурсы данных и их интеграция в структуру Международной виртуальной обсерватории // Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции : Тр. XIII Всерос. науч. конф. RCDL'2011, Воронеж, 19—22 окт. 2011 г. — Воронеж : Издат.-полиграф. центр Воронеж. гос. ун-та, 2011. — С. 317—325.
4. Zhelenkova O. P., Vitkovskij V. V., Briukhov D., Kalinichenko L. A. // ASP Conf. Ser. — 2006. — Vol. 351. — P. 244.

## КОСМОЛОГИЯ: ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ

В статье дан краткий обзор концептуальных вопросов космологии.

We give a short review of conceptual problems of the cosmology.

### Космологические принципы и парадоксы

В истории космологии «стандартные» модели Вселенной, особенно в последнее время, корректировались довольно часто. По-видимому, и современная стандартная  $\Lambda$ CDM модель не вечна. Поэтому мы в своей лекции будем говорить в основном не о конкретных космологических моделях, а о принципах, лежащих в их основе, и о методах их построения.

Всякое построение новой космологической модели должно основываться на определенных общих принципах. Обсудим некоторые из них.

- **Принцип Коперника.** Мы не должны без веских оснований приписывать нам выделенное (особое) место во Вселенной. В широком смысле этот принцип можно трактовать так: наше положение во Вселенной не может быть особым ни в каком смысле. Экстремальным вариантом принципа Коперника является «совершенный космологический принцип»: Вселенная выглядит одинаково из любой точки и в любой момент времени. Этот принцип лежит в основе стационарных космологических моделей. Принцип Коперника можно подвергнуть критике: до сих пор не найдено экзопланеты, похожей на Землю. Однако, с другой стороны, наши технические возможности только подбавляются к этому пределу.
- **Антропный принцип.** Различают два антропных принципа: слабый — мы живем в одном из многих миров (множественность вселенных), таком, что значения мировых констант в



нашем мире благоприятствуют появлению наблюдателя; сильный — Вселенная должна иметь свойства, с необходимостью приводящие к нашему появлению. Заметим, что возможна теологическая трактовка сильного антропного принципа — Создатель, находящийся вне нашего мира.

- **Принцип Маха.** Этот принцип утверждает нелокальность космологии. Согласно принципу Маха инертные свойства любого тела определяются всеми остальными телами во Вселенной. Одна из математических формулировок принципа Маха была дана Деннисом Сиамой. Он получил выражение для инертной массы тела. Если «отключить» гравитацию, то инертная масса тела будет равна нулю. Заметим, что в классической механике считается, что инертная масса не зависит от наличия или отсутствия других тел (концепция абсолютного пространства).
- **Принцип Оккама.** Этот принцип можно сформулировать так: «Не следует множить сущности без необходимости». В известных физических теориях, следующих принципу Оккама (классической механике, термодинамике, электродинамике Максвелла), из минимального набора допущений вытекает огромное число следствий. Принцип таков: «Знание одной вещи должно порождать знание тысячи вещей» (Мусаши). Исторический пример теории, не соответствующей принципу Оккама, являет теория Птолемея. В этой теории для достижения согласия теории с новыми наблюдательными данными происходила постоянная корректировка теории — добавление новых эпициклов. При этом зачастую игнорировались возникающие трудности (например, не вписывающиеся в теорию слишком слабые изменения углового диаметра Луны — по теории Птолемея он должен меняться примерно в два раза).

Другой, более современный пример представляет теория расширяющейся Вселенной. Многие ранние предсказания (флуктуации температуры микроволнового фона  $\Delta T/T \sim 10^{-3}$ , космогония галактик, первичный нуклеосинтез по Гамову) забываются. Однако возникают новые «эпициклы»: теория инфляции, темная энергия, синтез элементов в звездах населения III и т. д. Роль изменений углового диаметра Луны играют крупномасштабные неоднородности в распределении вещества, по теории они не должны превышать  $\sim 10$  Мпк. Аномалии на картах СМВ приводят к целой серии «эпициклов».

Двигателем космологии, как и всякой другой науки, являются парадоксы — ситуации, которые могут в принципе существовать в действительности, но не имеют логического объяснения. Размышления над парадоксами приводят к новым идеям и концепциям. В ньютоновской космологии (бесконечная Вселенная, равномерно заполненная светящейся материей — звездами, которые притягивают друг друга по закону обратных квадратов) известны парадоксы Ольберса и Зеелигера.

Первый из них был высказан в 1823 г. немецким врачом и астрономом Генрихом Ольберсом. Кратко парадокс можно сформулировать так: «Почему ночью небо темное?». Если в бесконечном пространстве равномерно распределены источники излучения конечных размеров, то в любом направлении на луче нашего зрения окажется источник излучения. Следовательно, поверхность неба будет ослепительно яркой, чего в реальности не наблюдается. Для объяснения этого фотометрического парадокса Ольберс предположил, что между звездами имеется рассеянное вещество, поглощающее излучение более далеких светил. Однако в бесконечной и вечной Вселенной сами поглотители излучения нагрелись бы до температуры звездной поверхности и светились бы как источники излучения.

Второй парадокс ньютоновской космологии — гравитационный — был высказан в 1895 г. немецким астрономом Гуго Зеелигером. Он состоит в том, что гравитационная сила, действующая на тело со стороны всех остальных тел Вселенной, не определена. При разных способах определения этой величины она меняется от нуля до бесконечности. То же касается и гравитационного потенциала. Современный анализ проблемы дан в [1].

Эти парадоксы преодолеваются в релятивистской космологии: фотометрический парадокс устраняется, поскольку из-за красного смещения яркость далеких объектов понижается; решение гравитационного парадокса в ОТО часто связывают с конечностью распространения взаимодействия (со скоростью света).

Третий космологический парадокс — тепловая смерть Вселенной. Этот парадокс связан с ростом энтропии во Вселенной при сохранении ее полной энергии. При этом все виды энергии перейдут в тепловую энергию. Вывод о тепловой смерти Вселенной был сформулирован немецким физиком и математиком Рудольфом Клаузиусом в 1865 г. Решение этого парадокса можно искать на пути перекачки энергии и энтропии во внутренние степени свободы — формирование иерархических структур. Современная наука не может ни доказать,

ни опровергнуть гипотезу о тепловой смерти Вселенной, поскольку не обладает достаточным для этого объемом знаний. Заметим, что этот вопрос связан с вопросом о Первоначале, который относится как к естественным наукам, так и к теологии.

Заметим, что существенный и основополагающий вклад в развитие космологии в свое время внесла известная переписка между Ньютоном и епископом Бентли (будущим главой Тринити-колледжа в Кембридже, где долгое время работал и Ньютон) в конце XVII в. Эта переписка также находится на грани между наукой и Верой в Бога. Ньютон придерживается концепции Первоначала, Творения мира Создателем. Здесь он вводит понятия абсолютного пространства и времени, никак не связанных с телами, заселяющими пространство и меняющимися во времени. В Абсолютном мире время идет синхронно во всей Вселенной сразу, и пространство есть абсолютное пространство большой бесконечной видимой Вселенной, заполненной материальными движениями. Эта переписка двух великих умов человечества послужила дальнейшему развитию ньютоновской космологии. До сих пор она представляет не только исторический, но и методологический интерес.

## Космография

Со времен Античности до середины XIX в. космологические модели использовали непосредственные оценки расстояний только до объектов Солнечной системы. Для звезд имелись только оценки, основанные на предположении, что звезды имеют ту же природу, что и Солнце. Первые реалистичные представления о звездной Вселенной начинают формироваться с массовыми измерениями параллаксов звезд. В начале XX в. (1908) появляются первые «стандартные свечи» — цефеиды (работы мисс Генриетты Левитт и ее группы). Они используются для оценок расстояний в пределах нашей Галактики — Млечного Пути и до ближайших галактик, в частности Магеллановых Облаков.

Следующий важный шаг в космографии был сделан в начале XX в., когда начались массовые измерения лучевых скоростей галактик по их спектрам. Здесь особо следует отметить работы Слайфера в Лоуэлловской обсерватории. Благодаря работам Слайфера, Леметр и Хаббл независимо установили важную эмпирическую зависимость между расстоянием  $r$  до галактики и ее красным смещением  $z$ :

$$z = \frac{Hr}{c},$$

где  $c$  — скорость света;  $H$  — постоянная Хаббла или параметр Хаббла. Хотя, согласно недавним работам историков астрономии, эту константу правильнее было бы назвать постоянной Леметра—Хаббла. Заметим, что полученное соотношение между  $r$  и  $z$  оказалось справедливым только для сравнительно близких галактик при  $z \ll 1$ . При  $z \sim 1$  и более появляется нелинейность, характер которой определяет космологическую модель и значения параметров в пределах данной теории.

В космологии различают несколько мер расстояний между объектами. Основных из них три: метрическое, фотометрическое и угловое. Эти расстояния различаются по способам их определения. В моделях расширяющейся Вселенной расстояния между сопутствующими объектами постоянно меняются. Все меры расстояния в релятивистской космологии служат для измерения промежутков между событиями вдоль траекторий, заканчивающихся в точке, где находится наблюдатель. Хороший обзор мер расстояния в космологии дан в работе Дэвида Хогга [2].

Сразу же после обнаружения зависимости между красным смещением и расстоянием до галактики перед астрономами встала проблема интерпретации полученной зависимости и тестирования той или иной гипотезы посредством наблюдений.

Одним из первых таких космологических тестов была диаграмма Хаббла — зависимость между красным смещением объекта и его видимой величиной  $m$ . Кстати, именно диаграмма Хаббла сыграла решающую роль в формулировке концепции ускоренного расширения Вселенной по наблюдениям сверхновых типа Ia в конце XX в. (см. [3, 4]). Сверхновые на  $z \sim 1$  оказались примерно на  $1^m$  слабее, чем предсказывала стандартная на то время космологическая модель «пустой» Вселенной Фридмана—Леметра—Робертсона—Уолкера. Авторы [3, 4] интерпретировали свои результаты как свидетельство ускоренного расширения Вселенной. Некоторые из них в 2011 г. были удостоены за это смелое утверждение Нобелевской премии по физике. Таким образом, возникла  $\Lambda$ CDM модель, которая через некоторое время получила статус стандартной космологической модели. В то же время остается открытым вопрос о природе как темной энергии, так и темной материи, составляющих в совокупности 96 % плотности Вселенной.

Еще один тест был предложен Ричардом Толменом в 30-е гг. XX в. Он основан на соотношении между поверхностной яркостью  $\Sigma$  галактики и ее красным смещением. Заметим, что тест Толмена весьма чувствителен к принятой модели. Например, в  $\Lambda$ CDM модели имеет место соотношение

$$\Sigma \propto (1+z)^{-4},$$

где вторая степень обусловлена увеличением углового размера галактик в моделях с расширением пространства, еще единица связана с красным смещением принимаемого наблюдателем фотона и наконец еще одна единица — с уменьшением числа приходящих к наблюдателю фотонов из-за удаления источника излучения. Кстати, наблюдения на космических и больших наземных телескопах (сверхглубокие обзоры) дают меньший наклон:

$$\Sigma \propto (1+z)^{-2 \div -3}.$$

А в модели «усталого света» должно быть

$$\Sigma \propto (1+z)^{-1}.$$

Заметим, что кроме космографических причин падения поверхностной яркости протяженного источника существуют и физические причины: томсоновское рассеяние фотонов на заряженных частицах, поглощение излучения и др.

Еще один тест был предложен в 1959 г. Фредом Хойлом. Он основан на соотношении между угловым размером галактики и ее красным смещением. Этот тест сродни тесту Толмена, однако он не столь чувствителен к эволюции размера и эффектам наблюдательной селекции.

Для сравнительного анализа различных космологических моделей также могут использоваться подсчеты галактик и других внегалактических объектов; содержание тяжелых элементов на больших  $z$ ; наличие и характеристики крупномасштабных структур на  $z \sim 1 \div 10$ ; признаки фрактального распределения вещества.

В свое время предлагались космологические модели, в которых происходит изменение со временем мировых констант, однако в дальнейшем такие модели были отвергнуты. То же самое произошло и с моделями, в которых красное смещение имеет чисто гравитационную природу.

## Физическая космология и космологическая физика

Можно рассмотреть, к чему приведет применение «земной» физики на космологических масштабах. Заметим, что правильное говорить «хаббловские масштабы», так как в свое время под космологическими подразумевались масштабы в несколько парсек, и даже Эйнштейн при разработке теории относительности опирался на звездную Вселенную. О галактиках речь тогда не шла.

Предсказание микроволнового фонового излучения (СМВ) как реликта горячего Большого взрыва было сделано Георгием Гамовым. С другой стороны, Фред Хойл говорил о микроволновом фоне как о термализованном излучении звезд. Само СМВ было обнаружено в Пулковской обсерватории в 1955 г. аспирантом Т. А. Шмаоновым. Он измерил температуру и отметил изотропию этого излучения. Статья Шмаонова была опубликована в 1957 г. в журнале «Приборы и техника эксперимента» и не получила широкой огласки в астрономическом сообществе. Десять лет спустя СМВ было переоткрыто и интерпретировано Пензиасом и Вильсоном, за что в 1978 г. эти исследователи были удостоены Нобелевской премии по физике.

После открытия СМВ встала проблема поиска флуктуаций его температуры, предсказывавшихся, например, теорией «блинов» Зельдовича на уровне  $\sim 10^{-3}$ . На эту тему было множество публикаций в 70-е и 80-е гг. XX в., однако впоследствии она была опровергнута наблюдениями. Изучение флуктуаций СМВ до сих пор является одним из основных «полигонов» для тестирования космологических моделей.

Наиболее детально к настоящему времени СМВ исследовано в космическом эксперименте WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe). По данным WMAP было построено распределение по небесной сфере температуры СМВ. Для обработки этого распределения часто используется математический аппарат сферических функций (см., например, [5]). Предварительно проводится очистка карт от объектов фона (см., например, [6]). Далее изучаются свойства флуктуаций температуры СМВ и его поляризации (см., например, [7]). Эта «подгоночная» модель зависит от шести параметров, значения которых оцениваются методом наибольшего правдоподобия [7]. При этом предполагается гауссов спектр флуктуаций температуры СМВ.

В то же время многие авторы отмечают различного рода аномалии на картах СМВ (см., например, [8] и ссылки в этой статье).

Одной из таких аномалий являются так называемые «холодные пятна» — области пониженной температуры СМВ. Эти пятна выстраиваются в четыре вытянутые структуры («пальцы»), тянущиеся от южного полюса Галактики в направлении Галактического экватора. Таким образом, наблюдается асимметрия между северным и южным галактическими полушариями. Другая характерная деталь в распределении флуктуаций температуры СМВ — так называемая «Ось Зла». Эта ось определяет сходную ориентацию квадруполь и октуполь на картах СМВ. Причем соответствующее направление, возможно, связано с плоскостью эклиптики (см., например, [9]).

В работе [8] все отмеченные аномалии объясняются как случайные флуктуации. С другой стороны, существенную роль может играть невычищенность переднего фона, а именно пылевая материя в галактиках и в межгалактическом пространстве на умеренных  $z \sim 1 \div 10$ . Из этого следует, что мы можем наблюдать сильно зашумленную поверхность последнего рассеяния (ППР), а флуктуации СМВ связаны не с первичными барионными акустическими осцилляциями, а с неоднородностями в распределении пылевой материи на умеренных  $z$ .

Отдельную проблему представляет эпоха реионизации. Команда WMAP оценивает оптическую глубину для эпохи реионизации  $\tau = 0.088 \pm 0.015$  как один из шести параметров «подгоночной»  $\Lambda$ CDM модели [7]. Однако в реальности величина  $\tau$  может быть существенно больше, и тогда возникает экранирование ППР. В этом случае мы будем видеть только более близкие объекты на умеренных  $z \sim 1 \div 10$ . При этом флуктуации СМВ могут формироваться при  $z$ , много меньших  $z \approx 1000$ , соответствующих ППР.

Таким образом, вопрос о прозрачности пространства до ППР является одним из ключевых вопросов современной космологии. В качестве «экрана» перед ППР могут выступать невычищенные галактики переднего фона, облака ионизованного газа в эпоху реионизации и протопротогалактики, формирующиеся в «темные века». Оценки степени экранирования ППР довольно затруднены и модельно зависимы. Тем не менее они необходимы.

Сильнейшим ударом по стандартной  $\Lambda$ CDM модели было бы обнаружение крупномасштабных структур (сверхскоплений и пустот) на масштабах сотен и даже тысяч мегапарсек. Такие структуры об-

наруживаются в обзорах красных смещений галактик (наиболее яркий пример — Великая Слоановская Стена). Признаками фрактальности обладает и распределение источников гамма-всплесков, трассирующих распределение вещества [10].

В работе [11] авторы дают оценки масс отдельных скоплений галактик, которые не могут возникнуть в стандартной  $\Lambda$ CDM модели. Обнаружение подобных структур было бы смертельным ударом по этой модели и самой парадигме темной энергии. Критическая масса скопления, допустимая в  $\Lambda$ CDM модели, зависит от  $z$ : ее оценка составляет  $\sim 10^{15} M_{\odot}$  при  $z = 0$  и  $\sim 10^{14} M_{\odot}$  при  $z = 2$ . Авторы [11] отмечают, что пока не обнаружено столь массивных скоплений галактик, чтобы они противоречили стандартной  $\Lambda$ CDM модели.

Еще один физический эффект, важный для космологии, — это гравитационное линзирование (первые гравитационные линзы на хаббловских масштабах были обнаружены в 1979 г.). В качестве гравитационных линз могут выступать отдельные галактики, скопления галактик и квазары. Линзирование приводит к появлению кратных изображений одного и того же объекта (например, квазара) и к усилению его блеска. Возможно, большинство изображений квазаров подверглись воздействию гравитационных линз. Это обстоятельство следует учитывать при использовании популяции квазаров для тестирования космологических моделей.

Методы спектроскопии используются для поиска проявлений изменений мировых констант (гравитационной постоянной, скорости света, постоянной тонкой структуры и др.). Наклаываются определенные верхние пределы на вариации этих величин, которые также важны для физической космологии.

Известная в механике теорема вириала в конце 30-х гг. XX в. привела к вириальному парадоксу и представлению о скрытой массе — некоторой труднонаблюдаемой субстанции, составляющей львиную долю (более 80 %) массы вещества во Вселенной.

Имеется целый спектр гипотетических кандидатов на роль частиц темной материи: аксионы, монополи, WIMPy и т. д. Часто их объединяют в один класс под общим названием «нейтралино». Однако до сих пор эти частицы не были обнаружены. Такая неуязвимость темной материи объясняется ее слабым взаимодействием с обычным барионным веществом.

Указаниями на наличие темной материи или «скрытой массы» являются некоторые наблюдательные факты для мира галактик и скоплений галактик: «плоскостность» кривых вращения дисковых



галактик; «вириальный парадокс» для скоплений галактик, обнаруженный Цвикки в 30-е гг. XX в. («динамические» массы скоплений на несколько порядков величины превышают их массы, оцененные по светимостям галактик).

Отсутствие непосредственных обнаружений кандидатов в скрытую массу привело к появлению альтернативных моделей гравитационного взаимодействия, отличающихся от ньютоновского на хабловских расстояниях или в случае малых ускорений. Одной из таких теорий является модифицированная ньютоновская динамика (MOND), предложенная в 1983 г. Мордехаем Мильгромом. В рамках MOND в случае малых ускорений меняется закон гравитационного взаимодействия тел. Таким образом, в рамках MOND удастся объяснить «плоские» кривые вращения дисковых галактик без привлечения скрытой массы.

В последнее время появляются и другие модификации гравитации. Их можно объединить под одним термином MOG — модифицированная гравитация. В частности, иногда в закон Ньютона вводится дополнительный экспоненциальный множитель, аналогичный множителю в потенциале Юкавы для сильного взаимодействия. Этот множитель приводит к экспоненциальному ослаблению гравитации на масштабах порядка размеров крупномасштабных структур в пространственном распределении галактик и устраняет известный гравитационный парадокс Зеелигера, присущий ньютоновской теории (см. выше).

С космологическими моделями связана и термодинамика. Первое начало термодинамики обеспечивает сохранение полной энергии в замкнутой системе. Сразу встает философский вопрос о замкнутости или открытости Вселенной. Второе начало термодинамики гарантирует возрастание энтропии (меры хаоса) в замкнутой системе. С другой стороны, мы наблюдаем увеличение сложности крупномасштабных структур по мере приближения из прошлого к современной эпохе. Свидетельствует ли этот факт об открытости Вселенной как термодинамической системы? Отметим здесь, что структуры могут формироваться в неравновесных термодинамических системах. Согласно воззрениям нобелевского лауреата по химии Ильи Приго-

жина и его школы неравновесные термодинамические системы могут совершать качественные скачки к усложнению структуры за счет потока энергии и энтропии из окружающей среды.

Кроме проявлений «земной» физики на хаббловских масштабах в наблюдательной космологии проявляются свои специфические закономерности, которые мы не можем наблюдать в земных условиях.

Основу всякой космологической модели составляет теория гравитации. В основе стандартной ныне  $\Lambda$ CDM модели лежит общая теория относительности (ОТО) Эйнштейна. Наряду с ОТО в литературе предлагаются и другие, как правило более экзотические, теории гравитации, такие, как теория Калуцы—Клейна, объединившая гравитацию и электромагнетизм путем расширения пространства Минковского до пятимерного (однако в этой теории не нашлось места электрону, что противоречит данным эксперимента); различные варианты «бранных» теорий как развитие теории струн (в этой теории Вселенная имеет 11 пространственно-временных измерений, а наш мир является миром на бране — трехмерной гиперповерхности в этой многомерной Вселенной); теория «кротовых нор» — туннелей между различными вселенными.

Существенную роль в развитии космологических моделей в конце XX в. сыграла теория хаотической инфляции, предложенная Аланом Гуттом в начале 80-х гг. XX в. Согласно этой теории за первые  $10^{-35}$  с после Большого взрыва Вселенная расширилась в  $10^{27}$  раз и в результате приобрела размер около 1 см. Центральную роль в теории инфляции играет так называемый «ложный вакуум», обладающий «отталкивающей гравитацией» или отрицательным давлением. Однако получение плоской Вселенной без инфляции гораздо более вероятно, чем получение плоской Вселенной путем инфляционного расширения. Эта мысль была впервые высказана Роджером Пенроузом еще в 80-е гг. XX в. на основе термодинамических принципов. Таким образом, более вероятно, что Вселенная подошла к современной стадии эволюции без инфляционной стадии. Заметим, что концепция «ложного вакуума» сродни теологической концепции Первоначала, поскольку и то и другое невоспроизводимо и является вопросом веры.

Таким образом, состояние современной космологии можно охарактеризовать как предкризисное. Слишком много возникает моментов и нелогичностей, не вписывающихся в стандартную  $\Lambda$ CDM модель. Дальнейшие наблюдения и их анализ должны показать, удост-

ся ли залатать имеющиеся «дыры» введением новых «эпициклов» или придется в очередной раз перестраивать все космологическое здание, начиная с фундамента.

Работа выполнена при поддержке Программы государственной поддержки ведущих научных школ РФ (проект НШ-3290.2010.2).

## Список библиографических ссылок

1. *Raikov A. A., Orlov V. V.* Method of pairwise separations and its astronomical applications // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2011.
2. *Hogg D. W.* Distance measures in cosmology // ArXiv Astrophysics e-prints. — 1999. [arXiv:astro-ph/9905116](#).
3. *Riess A. G., Filippenko A. V., Challis P. et al.* Observational evidence from supernovae for an accelerating Universe and a cosmological constant // Astron. J. — 1998. — Vol. 116. — P. 1009—1038.
4. *Perlmutter S., Aldering G., Goldhaber G. et al.* Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 high-redshift supernovae // Astrophys. J. — 1999. — Vol. 517. — P. 565—586.
5. *Jarosik N., Bennett C. L., Dunkley J. et al.* Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: sky maps, systematic errors, and basic results // Astrophys. J., Suppl. Ser. — 2011. — Vol. 192. — P. 14 (15 pp.).
6. *Gold B., Odegard N., Weiland J. L. et al.* Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: galactic foreground emission // Astrophys. J., Suppl. Ser. — 2011. — Vol. 192. — P. 15 (28 pp.).
7. *Larson D., Dunkley J., Hinshaw G. et al.* Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: power spectra and WMAP-derived parameters // Astrophys. J., Suppl. Ser. — 2011. — Vol. 192. — P. 16 (19 pp.).
8. *Bennett C. L., Hill R. S., Hinshaw G. et al.* Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: are there Cosmic Microwave Background anomalies? // Astrophys. J., Suppl. Ser. — 2011. — Vol. 192. — P. 17 (19 pp.).
9. *Doroshkevich A., Verkhodanov O.* CMB component separation in the pixel domain // Phys. Rev. D. — 2011. — Vol. 83. — P. 043002.
10. *Raikov A. A., Orlov V. V., Beketov O. B.* Inhomogeneities in the spatial distribution of gamma-ray bursts // Astrophysics. — 2010. — Vol. 53. — P. 396—408.
11. *Mortonson M. J., Hu W., Huterer D.* Simultaneous falsification of  $\Lambda$ CDM and quintessence with massive, distant clusters // Phys. Rev. D. — 2011. — Vol. 83. — P. 023015.

## ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫЕ ЗВЕЗДЫ

Представлен краткий обзор современного состояния исследований химически пекулярных звезд Главной Последовательности.

A brief review of the modern state in chemically peculiar stars investigation is given.

### Введение

Химически пекулярные звезды (CP stars) являются звездами верхней части главной последовательности, которые имеют в спектрах аномально сильные линии некоторых химических элементов (He, Hg, Mn, Si, Cr, Sr, Eu). Такие особенности в спектрах этих звезд были замечены еще в конце XIX в. при работе с классификацией звезд по Гарвардским пластинкам [1] и были отмечены буквой «Р». Современная классификация химически пекулярных звезд как класса была предложена Морганом [2]. Все CP-звезды разделяются на две большие группы: магнитные (BrAr или в более общем виде Ap) и немагнитные (HgMn и Am). Магнитные звезды составляют 10–15 % от нормальных звезд в спектральном диапазоне B5–A0 с резким уменьшением относительного числа в сторону поздних спектральных классов от A0 до F5. Ap-звезды обладают глобальными магнитными полями полоидального типа, интенсивность продольного компонента которых меняется в широких пределах от нескольких десятков гаусс [3] до десятков килогаусс — известная звезда Бэбкока HD 215441 [4], тогда как в атмосферах HgMn-звезд и Am-звезд (звезды с усиленными линиями металлов) таких полей не зарегистрировано. В свою очередь, магнитные Ap-звезды разделяются на подклассы. Аномальные химические элементы дали названия подклассам Ap-звезд: He-strong (звезды с усиленными линиями гелия), He-weak (звезды с ослабленными линиями гелия)  $\lambda$  4200-Si, Si-, SiCr-, Si-Cr-Eu-, SrCrEu-, Sr-звезды. Эта последовательность статистически коррелирует с показателями цвета и, следовательно, с эффективной температурой. Яркая звезда  $\alpha^2$  CVn является прототипом класса BrAp-звезд.

На диаграмме Герцшпрунга—Рассела (ГР) все СР-звезды расположены в полосе Главной Последовательности (ГП) в интервале температур примерно от 17 000 до 6 000 К, причем самыми горячими являются He-strong-звезды, а самыми холодными — SrCrEu, Am и Sr-звезды. Положение СР звезд на ГП хорошо проиллюстрировано в статье [5], основанной на данных спутника Гиппарх. В ней сделан вывод, что ВрАр-звезды по положению на ГП и по кинематическим характеристикам принадлежат тонкому диску с возрастом около 1 Gyr.

## **Основные характеристики химически пекулярных звезд**

### **Фотометрическая, спектральная и магнитная переменность**

Практически все ВрАр-звезды являются фотометрическими, спектральными и магнитными переменными с одним и тем же периодом, который является периодом вращения звезды. Наблюдаемая переменность хорошо объясняется в рамках модели наклонного ротатора (см. обзоры [6, 7]). Согласно этой модели ось глобального (дипольного) магнитного поля звезды наклонена под произвольным углом к оси вращения. Химические элементы распределены в виде пятен на поверхности звезды. При вращении на луч зрения проецируются различные участки поверхности звезды с различным магнитным полем и содержанием химических элементов, что и наблюдается как периодические изменения магнитного поля, интенсивности спектральных линий и блеска. Предполагается, что пятнистая структура поверхности магнитных пекулярных звезд связана с магнитным полем, поэтому немагнитные HgMn и Am-звезды не должны показывать спектральной переменности. Однако в ряде работ за последние 10 лет (см., например, [8]) были обнаружены изменения профилей и интенсивностей линий некоторых элементов, таких, как Hg, Y. Доплеровское картирование поверхности самой яркой HgMn звезды  $\alpha$  And [8] обнаружило не только неоднородное распределение ртути по поверхности звезды, но также сезонные изменения этого распределения. Сделано предположение, что формирование пятен химического состава в атмосферах массивных звезд, возможно, связано с гидродинамической неустойчивостью в верхних слоях атмосфер.

## Вращение

Одной из основных отличительных характеристик класса СР-звезд является их медленное вращение по сравнению с нормальными звездами таких же спектральных классов (см. обзор [6]). Практически все звезды спектрального класса A0V с  $v < 15$  км/с, являются химически аномальными [9]. Звезда с магнитным полем может терять свой угловой момент в процессе формирования, а вот причина торможения немагнитных пекулярных звезд пока неясна. Исследования пекулярных звезд в скоплениях показывают, что скорость вращения не зависит от возраста, т. е. эти звезды теряют свой угловой момент до прихода на ГП. Большинство наблюдений переменности магнитных пекулярных звезд свидетельствуют о постоянстве периодов за все время наблюдений. Например, форма кривой спектральных изменений и период у  $\alpha^2$  CVn постоянны с момента первых наблюдений Белопольским в 1913 г. по настоящее время. Однако у некоторых быстровращающихся ВрАр-звезд была обнаружена переменность периода вращения. В работе [10] были проанализированы фотометрические, спектральные и магнитные наблюдения одной из самых короткопериодических Вр-звезд Si типа CU Vir ( $P = 0.52$  дня) за 40 лет и было обнаружено скачкообразное увеличение периода вращения на 2 с. CU Vir окружена магнитосферой, которая дает излучение в радиодиапазоне в форме коротких импульсов (радиопульсар — [11]). Радионаблюдения подтвердили замедление вращения CU Vir. Резкое замедление вращения было также обнаружено у быстровращающихся He-strong звезд HD 37776 [12], HR 7355 [13],  $\sigma$  Ori E [14].

## Магнитные поля

Магнитные поля в звездных атмосферах традиционно измеряют с помощью Зеемановского анализатора, который позволяет регистрировать отдельно спектры в разном состоянии круговой и линейной поляризации (I, V, Q и U — параметры Стокса). Чаще всего используется анализатор круговой поляризации V, что позволяет измерять усредненный по поверхности звезды компонент магнитного поля, направленный к наблюдателю, так называемое продольное магнитное поле. Параметры Q и U характеризуют линейную поляризацию. В последнее время появились поляриметры, измеряющие все четыре параметра Стокса. Такие поляриметры установлены на спектрографах крупных телескопов с высоким спектральным разреше-

нием, например HARPSpol на спектрографе HARPS 3.6 м телескопа Европейской Южной обсерватории. Спектральное разрешение этого прибора  $R = \Delta\lambda/\lambda = 120\,000$ . Применение таких поляриметров значительно расширило возможности исследования поверхностной геометрии магнитного поля методами доплеровского картирования. Если магнитное поле достаточно сильное, то магнитное расщепление спектральных линий можно измерить и в неполяризованном спектре в звездах с узкими линиями. В этом случае мы измеряем усредненный по поверхности звезды модуль вектора магнитного поля или поверхностное поле. Следует отметить, что величина поверхностного поля всегда больше величины продольного поля. Высокое спектральное разрешение современных звездных спектрографов ( $R = \sim 100\,000$ ) позволяет измерять минимальные поверхностные поля 1 000 гаусс по неполяризованным спектрам. К настоящему времени примерно для 500 ВрАр-звезд имеются прямые измерения продольного или поверхностного магнитного поля. Это около 12 % от числа звезд, классифицированных по спектрам как ВрАр.

Как уже было упомянуто выше, магнитные поля надежно зарегистрированы только в атмосферах ВрАр-звезд. Согласно самым последним исследованиям магнитного поля в 47 HgMn-звездах, проведенным по наблюдениям с поляриметром HARPSpol, крупномасштабные магнитные поля, характерные для ВрАр-звезд, в этой группе звезд отсутствуют [15]. Также очень мала вероятность наличия мелкомасштабных полей типа солнечного. Для многих звезд программы верхний предел поля меньше 10 Гс (ошибка наблюдений). Похожая ситуация наблюдается и в группе Ам-звезд [16].

Наблюдения и анализ переменности продольного магнитного поля показали, что у большинства звезд геометрия магнитного поля может быть представлена магнитным диполем. Однако доплеровское картирование наблюдений в четырех параметрах Стокса, выполненных недавно для нескольких ярких Ар-звезд (53 Cam и  $\alpha^2$  CVn, например), показало, что реальная структура магнитного поля на поверхности магнитных звезд гораздо сложнее и может быть представлена наклонным диполем только в первом приближении. В реальности топология магнитного поля есть комбинация дипольной структуры и локальных магнитных пятен повышенной напряженности (см. [17, 18]).

В работе [19] было проведено исследование эволюции магнитного поля у магнитных звезд в течение жизни на ГП. Были проанализированы магнитные поля звезд, принадлежащих рассеянному скоплению различного возраста, что существенно повысило точность определения возраста звезды по сравнению с магнитными звездами поля. Исследовалось распределение магнитного поля с возрастом для трех диапазонов масс: 2—3, 3—4 и 4—5  $M_{\odot}$ . Во всех трех случаях было получено, что максимальное поле имеют звезды на или вблизи нулевой главной последовательности (ZAMS), т. е. звезда приходит на ГП уже с сильным магнитным полем. Напряженность поля резко падает с увеличением возраста. Уменьшение магнитного потока происходит быстрее, чем предсказывает омический распад, что заставляет предполагать действие каких-то дополнительных механизмов распада.

Происхождение сильных магнитных полей в неконвективных атмосферах магнитных звезд до конца не понято. Принято считать, что крупномасштабное поле является остаточным магнитным полем звезды, которое у нее было в момент рождения и которое усилилось в ходе последующей эволюции.

### Эффективные температуры

Несмотря на наблюдаемые аномалии, глобальные характеристики большинства CP-звезд (распределение энергии в спектре, фотометрические индексы, интенсивность водородных линий) не сильно отличаются от соответствующих характеристик нормальных звезд того же спектрального класса, что дает возможность исследовать их атмосферы в первом приближении стандартными методами. Анализ химического состава атмосфер CP-звезд показал, что содержание аномальных элементов на порядки превышает содержание этих же элементов в атмосфере Солнца. Разумеется, эти аномалии не относятся к химическому составу звезды в целом, иначе ее глобальные характеристики не соответствовали бы звездам главной последовательности. Они локализованы только в очень небольшой части звезды — звездной атмосфере. Однако из-за аномального поглощения линиями металлов распределение энергии в спектре отдельной звезды может сильно отличаться от распределения энергии в спектре звезды с такой же эффективной температурой, имеющей солнечный химический состав. На рис. 1 приведено сравнение между наблюдаемым распределением энергии в спектре самой пекулярной из всех CP-звезд — звезды Пшибыльского (HD 101065) и теоретическим



распределением, рассчитанным с учетом сотен тысяч линий редкоземельных элементов, из которых и состоит весь спектр этого уникального объекта. В спектре звезды Пшибыльского практически нет линий элементов железного пика, преобладающих в солнечном спектре. Для сравнения дано распределение энергии в спектре нормальной звезды той же эффективной температуры. Рисунок 1 построен по результатам моделирования, представленного в работе [20].

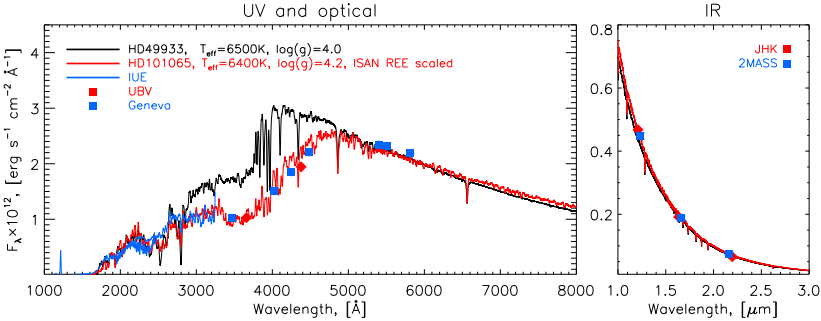


Рис. 1. Распределение энергии в спектре HD 101065: широкополосные наблюдения представлены различными значками, ультрафиолетовые — сплошной синей линией. Модельные расчеты с учетом сотен тысяч линий редкоземельных элементов показаны сплошной красной линией. Черной линией показано теоретическое распределение энергии в спектре звезды с солнечным химическим составом

Очевидно, что для детального анализа атмосфер химически пекулярных звезд необходимо использовать модели, рассчитанные с учетом индивидуальных аномалий химического состава.

## Структура атмосфер химически пекулярных звезд

Наблюдаемая периодическая переменность интенсивностей и профилей спектральных линий в спектрах ВрАр-звезд заставила с самого начала предположить пятнистую структуру их поверхности, которую восстанавливают из наблюдаемых профилей методами доплеровского картирования. Пионерскими работами в этом направлении стали работы В. Л. Хохловой [21, 22]. В последующие годы программы доплеровского картирования были усовершенствованы учеником В. Л. Хохловой и Н. Пискуновым и широко применяются для исследования неоднородности химического состава на поверхности

магнитных звезд. Магнитное доплеровское картирование позволяет одновременно восстанавливать структуру магнитного поля и распределение химического состава по поверхности звезды. Поскольку для картирования необходимо иметь качественные спектры высокого разрешения, хорошо распределенные по периоду вращения звезды, доплеровское картирование проведено для небольшого числа звезд и небольшого набора химических элементов. В этом смысле рекордсменом является холодная Ар-звезда HD 83368 (HR 3831), у которой получено распределение 17 элементов от самых легких Li, C, O до тяжелых редкоземельных элементов Nd, Eu (см. [23]). На рис. 2 показано распределение по поверхности некоторых элементов для разных фаз вращения звезды, которое любезно предоставлено автором, О. Кочуховым. Звезда видна с экватора вращения, а ось магнитного поля почти перпендикулярна оси вращения. Прекрасно видны некоторые закономерности в распределении элементов. Небольшие пятна Li находятся вблизи магнитных полюсов, Nd образует обширные области с очень высоким содержанием везде, кроме магнитного экватора, тогда как кислород, наоборот, сконцентрирован в довольно узкой полосе вдоль магнитного экватора.

Атмосферы Ар-звезд химически неоднородны не только по поверхности, но и по глубине атмосферы. Для объяснения химии Ар-звезд Мишо (1970) рассмотрел процесс создания химических аномалий в звездных атмосферах, устойчивых по отношению к турбулентным движениям, в котором происходит диффузия элемента под совокупным действием гравитационного осаждения и радиационного ускорения. В зависимости от преобладания одного из процессов химический элемент может «тонуть» вглубь со дна конвективной зоны (наилучший пример — гелий) или всплывать и накапливаться в атмосфере. Конвективная зона (например, зона H II) выполняет роль резервуара, обеспечивающего накопление элемента в верхних радиационных слоях атмосферы. В работе [24] была рассчитана диффузия химических элементов в оболочках звезд с массами от одной до пяти солнечных масс. Под оболочками здесь подразумеваются слои от фотосферы и глубже. Эти первые приблизительные расчеты показали, что некоторые элементы, Mg, Ca, должны иметь дефицит содержания в звездах с  $1.2\text{--}2.0 M_{\odot}$ , тогда как элементы железного пика должны наблюдаться в избытке, начиная с массы  $1.4 M_{\odot}$ , что соответствует эффективной температуре 6 500 К. Интересно, что само железо должно наблюдаться в дефиците вплоть до  $T_{eff} = 9\,000$  К. Чтобы правильно рассчитать конечное распределение по глубине в

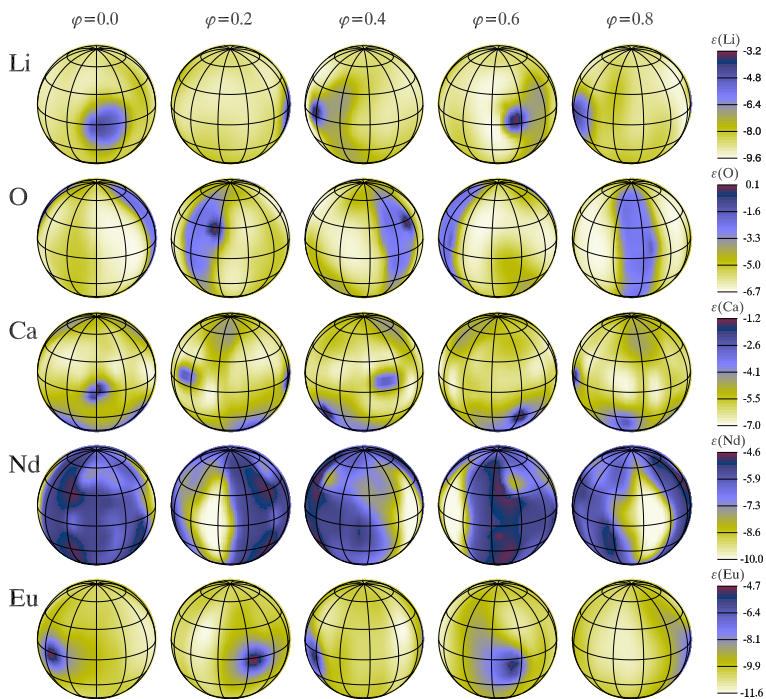


Рис. 2. Распределение химических элементов Li, O, Ca, Nd, Eu по поверхности Ар-звезды HD 83368

атмосфере звезды, необходимо учитывать детальную структуру атомов каждого элемента в первых стадиях ионизации и решать уравнение переноса для большого количества частот. Такие расчеты были проведены в работе [25] для элементов Ca, Ti, Cr, Mn, Sr для температуры 8 500 K, и впервые было показано, что в атмосфере звезды диффузия приводит к резким градиентам в распределении содержания элементов. В первом приближении это распределение можно представить ступенчатой функцией со скачком на глубине верхней границы конвективной зоны Н II, которая по критерию Шварцшильда соответствует  $\lg \tau_{5000} \sim -0.6$ .

В последнее время расчеты диффузии были введены в расчеты моделей атмосфер (см., например, [26]) и получена возможность получать сетки самосогласованных диффузионных моделей для срав-

нения с наблюдениями. Подробно химическая структура атмосфер магнитных звезд рассмотрена в работах [27, 28]. Температурное поведение наблюдаемых аномалий элементов Cr и Fe согласуется с результатами диффузионных расчетов. На рис. 3 представлены распределения содержания Cr и Fe с температурой для большого количества магнитных пекулярных звезд и сравнение их с результатами самосогласованных диффузионных расчетов.

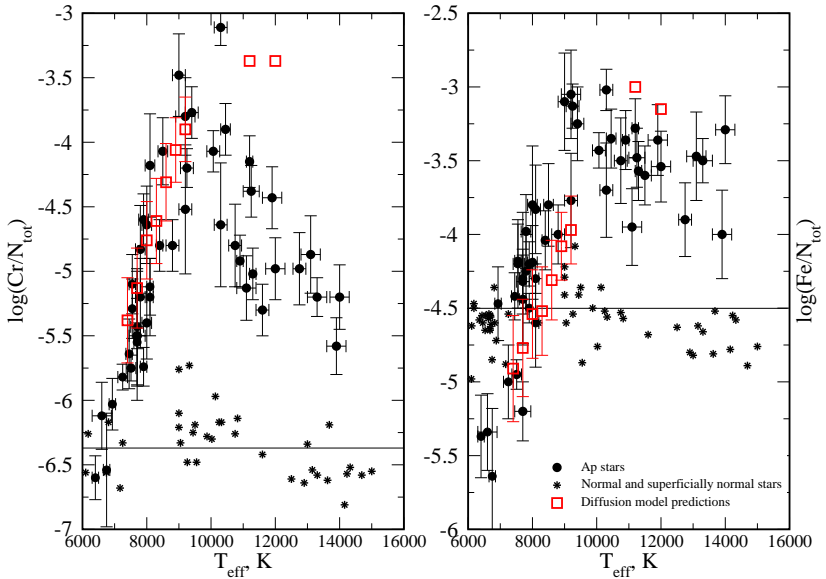


Рис. 3. Температурная зависимость средних содержаний Cr (левая панель) и Fe (правая панель) в атмосферах Ap-звезд. Содержание этих элементов, рассчитанных по самосогласованным диффузионным моделям, показаны открытыми красными квадратами

К сожалению, нет диффузионных расчетов для редкоземельных элементов (REE), которые могут играть ключевую роль как при расчете поглощения в атмосферах холодной части Ap-звезд (раздел «Эффективные температуры»), так и при интерпретации пульсаций Ap-звезд.

## Пульсирующие пекулярные звезды

Самые холодные Ар-звезды с эффективными температурами  $T_{eff} \leq 8000$  К попадают в так называемую классическую полосу неустойчивости. В этой полосе расположено подавляющее большинство классических пульсаторов типа  $\delta$  Sct, RR Lyr, цефеиды, которые пульсируют в низких обертонах радиальных и нерадиальных р-мод и в которых основным механизмом возбуждения пульсаций является зона ионизации гелия. Все Ар-звезды считаются обедненными гелием, поэтому в этом случае пульсаций не должно быть. Тем не менее английский астроном Д. Куртц в 1978 г. провел быструю фотометрию одной из самых пекулярных среди Ар-звезд — звезды Пшибыльского (HD 101065) и обнаружил переменность блеска с очень маленькой амплитудой ( $0.01^m$ ) и с периодом 12.15 мин [29]. Таким образом, звезда Пшибыльского дала начало новому классу пульсирующих звезд, которые называются roAr-звезды (rapidly oscillating Ap stars).

В настоящее время известно 46 roAr-звезд, обнаруженных как по фотометрическим наблюдениям, так и по изменению лучевых скоростей. Эти звезды лежат в интервале эффективных температур 6 400—8 100 К в средней части ГП. Периоды пульсаций очень короткие, 5—22 мин, с амплитудой (от пика к пику) 0.0008—0.015<sup>m</sup>. Отсюда следуют необычайно высокие требования к точности наблюдений этих звезд. Диапазон их магнитных полей очень велик, от практически нулевого поля (HD 203932) до среднего поверхностного поля, порядка 24.5 кГс (HD 154708). Большинство звезд мультипериодичны, что усложняет поисковые наблюдения, поскольку пульсации могут почти исчезать время от времени из-за биений. Чтобы объяснить данные наблюдений, Куртц [30] предложил модель, в которой ось пульсаций совпадает не с осью вращения, как у классических пульсаторов, а с осью магнитного поля, наклоненной к оси вращения звезды под определенным углом. Эта модель названа моделью наклонного пульсатора (МНП).

Подтверждение модели наклонного пульсатора получено по наблюдениям ряда звезд, в частности roAr-звезды HR 3831. Как уже было сказано, амплитуды колебаний блеска в roAr-звездах очень малы, но первые наблюдения колебаний лучевых скоростей (RV) показали, что RV амплитуды могут быть весьма большими и могут очень сильно зависеть от принадлежности спектральной линии, по которой проводятся наблюдения, тому или иному химическому элемен-

ту. В большинстве гоАр-звезд максимальную амплитуду пульсаций показывают линии REE, тогда как линии элементов Si и Cr, Fe практически не пульсируют. Ядра водородных линий H $\beta$  и H $\alpha$  пульсируют с промежуточными амплитудами. RV амплитуды варьируются от десятка метров ( $\beta$  CrB) до 5 км/с (HD 99563). Кроме изменения амплитуды пульсаций в зависимости от химического элемента также меняется фаза пульсаций. Все эти наблюдаемые особенности показаны на рис. 4, где приведены кривые изменения лучевых скоростей для линий различных элементов в спектре одной из наиболее изученных гоАр-звезд HD 24712 (HR 1217), свернутых с основным периодом пульсаций = 6.125 мин.

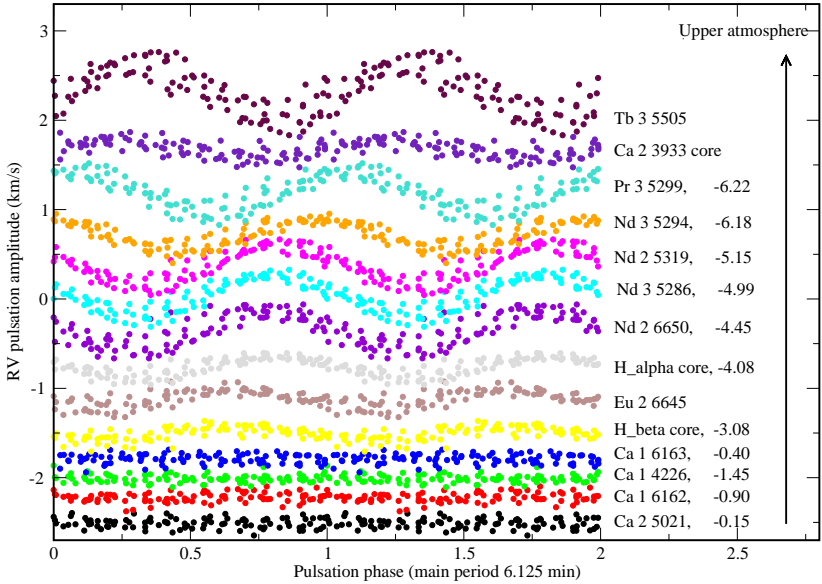


Рис. 4. Кривые изменения лучевых скоростей в спектре гоАр-звезды HD 24712, свернутые с основным периодом пульсаций = 6.125 мин. Справа указаны эффективные глубины образования в шкале log  $\tau_{5000}$

При анализе наблюдаемых аномалий химического состава в спектре одной из самых ярких гоАр-звезд  $\gamma$  Equ в работе [31] была предложена модель химической структуры атмосфер гоАр-звезд, которая объясняет наблюдаемые аномалии REE, температурную зависимость содержаний элементов железного пика от Ca до Fe и кото-

рая согласуется с предсказаниями теории диффузии. Согласно этой модели элементы Si, Ca, Cr, Fe, Ba концентрируются ближе к фотосферным слоям, а редкоземельные элементы Pr, Nd, Tb сосредоточены в облаке с концентрацией элемента на пять порядков больше солнечного, которое расположено на оптических глубинах выше  $\log \tau_{5000} = -4$ . В рамках этой модели рост амплитуды и фазы изменения лучевых скоростей в верхние слои атмосферы естественно объясняются бегущей пульсационной волной (см. [32]).

Кроме холодных Ap-звезд в полосу неустойчивости  $\delta$  Sct попадает также большинство Am-звезд, которые составляют примерно 50 % от общего количества звезд спектрального класса A8. В работе [33] приведены самые последние результаты по поиску и исследованию пульсаций в Am-звездах; 200 из 1 600 наблюдаемых Am-звезд показывают низкоамплитудные пульсации типа  $\delta$  Sct и  $\gamma$  Dor.

Исследование магнитных пекулярных звезд частично поддерживается Программой фундаментальных исследований Президиума РАН.

## Список библиографических ссылок

1. *Maury A. C., Pickering E. C.* Spectra of bright stars photographed with the 11-inch Draper Telescope as part of the Henry Draper Memorial. // *Annals of Harvard College Observatory.* — 1897. — Vol. 28. — P. 1—128.
2. *Morgan W. W.* Some Evidence for the Existence of a Peculiar Branch of the Spectral Sequence in the Interval B8-Fo // *Astrophys. J.* — 1933. — Vol. 77. — P. 330.
3. *Aurière M., Wade G. A., Silvester J. et al.* Weak magnetic fields in Ap/Bp stars. Evidence for a dipole field lower limit and a tentative interpretation of the magnetic dichotomy // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 475. — P. 1053—1065. 0710.1554.
4. *Babcock H. W.* The 34-KILOGAUSS Magnetic Field of HD 215441. // *Astrophys. J.* — 1960. — Vol. 132. — P. 521.
5. *Gomez A. E., Luri X., Grenier S. et al.* The HR-diagram from HIPPARCOS data. Absolute magnitudes and kinematics of BP - AP stars // *Astron. Astrophys.* — 1998. — Vol. 336. — P. 953—959.
6. *Wolff S. C.* The A-stars: Problems and perspectives. Monograph series on nonthermal phenomena in stellar atmospheres. — 1983.
7. *Хохлова В. Л.* Магнитные звезды. — М. : ВИНТИ, 1983. — Т. 24. — С. 233—289.

8. Kochukhov O., Adelman S. J., Gulliver A. F., Piskunov N. Weather in stellar atmosphere revealed by the dynamics of mercury clouds in  $\alpha$  Andromedae // *Nature Physics*. — 2007. — Vol. 3. — P. 526–529. 0705.4469.
9. Ramella M., Boehm C., Gerbaldi M., Faraggiana R. 'Normal' main sequence AO stars of low rotational velocity // *Astron. Astrophys.* — 1989. — Vol. 209. — P. 233–243.
10. Pyper D. M., Ryabchikova T., Malanushenko V. et al. An abrupt decrease in the rotational period of the chemically peculiar magnetic star CU Virginis // *Astron. Astrophys.* — 1998. — Vol. 339. — P. 822–830.
11. Ravi V., Hobbs G., Wickramasinghe D. et al. Observations of radio pulses from CU Virginis // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2010. — Vol. 408. — P. L99–L103. 1008.3592.
12. Mikulášek Z., Krtička J., Henry G. W. et al. The extremely rapid rotational braking of the magnetic helium-strong star HD 37776 // *Astron. Astrophys.* — 2008. — Vol. 485. — P. 585–597.
13. Mikulášek Z., Krtička J., Henry G. W. et al. HR 7355 — another rapidly braking He-strong CP star? // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 511. — P. L7. 1002.4339.
14. Townsend R. H. D., Oksala M. E., Cohen D. H. et al. Discovery of Rotational Braking in the Magnetic Helium-strong Star Sigma Orionis E // *Astrophys. J., Lett.* — 2010. — Vol. 714. — P. L318–L322. 1004.2038.
15. Makaganiuk V., Kochukhov O., Piskunov N. et al. The search for magnetic fields in mercury-manganese stars // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 525. — P. A97. 1010.3931.
16. Aurière M., Wade G. A., Lignières F. et al. No detection of large-scale magnetic fields at the surfaces of Am and HgMn stars // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 523. — P. A40. 1008.3086.
17. Kochukhov O., Bagnulo S., Wade G. A. et al. Magnetic Doppler imaging of 53 Camelopardalis in all four Stokes parameters // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 414. — P. 613–632.
18. Kochukhov O., Wade G. A. Magnetic Doppler imaging of  $\alpha^2$  Canum Venaticorum in all four Stokes parameters. Unveiling the hidden complexity of stellar magnetic fields // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 513. — P. A13. 1002.0025.
19. Landstreet J. D., Bagnulo S., Andretta V. et al. Evolution of the Magnetic Fields of Magnetic Ap Stars During the Main Sequence Phase // *Magnetic Stars*. — 2011. — P. 14–22.
20. Shulyak D., Ryabchikova T., Kildiyarova R., Kochukhov O. Realistic model atmosphere and revised abundances of the coolest Ap star HD 101065 // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 520. — P. A88. 1004.0246.



21. Гончарский А. В., Степанов В. В., Хохлова В. Л., Ягола А. Г. Картирование химических элементов на поверхности Ap звезд. I Решение обратной задачи нахождения локальных профилей спектральных линий // Астрон. журн. — 1982. — Т. 59. — С. 1146—1156.
22. Гончарский А. В., Рябчикова Т. А., Степанов В. В. и др. Картирование химических элементов на поверхности Ap звезд. II Распределение Eu, Sr, и Si на поверхности звезд  $\alpha^2$  CVn,  $\chi$  Ser, и CU Vir // Астрон. журн. — 1983. — Т. 60. — С. 83—90.
23. Kochukhov O., Drake N. A., Piskunov N., de la Reza R. Multi-element abundance Doppler imaging of the rapidly oscillating Ap star HR 3831 // Astron. Astrophys. — 2004. — Vol. 424. — P. 935—950.
24. Michaud G., Charland Y., Vauclair S., Vauclair G. Diffusion in main-sequence stars — Radiation forces, time scales, anomalies // Astrophys. J. — 1976. — Vol. 210. — P. 447—465.
25. Babel J. Magnetically confined wind on the AP star 53 Camelopardalis? // Astron. Astrophys. — 1992. — Vol. 258. — P. 449—463.
26. Leblanc F., Monin D., Hui-Bon-Hoa A., Hauschildt P. H. Stellar model atmospheres with abundance stratification // Astron. Astrophys. — 2009. — Vol. 495. — P. 937—944.
27. Рябчикова Т. А. Температурное поведение содержания химических элементов в атмосферах магнитных пекулярных звезд // Письма в Астрон. журн. — 2005. — Т. 31. — С. 437—446.
28. Ryabchikova T. Abundance structure of the atmospheres of magnetic CP stars // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. — 2008. — Vol. 38. — P. 257—266.
29. Kurtz D. W. 12.15 Minute Light Variations in Przybylski's Star, HD 101065 // Information Bulletin on Variable Stars. — 1978. — Vol. 1436. — P. 1.
30. Kurtz D. W. Rapidly oscillating AP stars // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1982. — Vol. 200. — P. 807—859.
31. Ryabchikova T., Piskunov N., Kochukhov O. et al. Abundance stratification and pulsation in the atmosphere of the roAp star boldmath gamma Equulei // Astron. Astrophys. — 2002. — Vol. 384. — P. 545—553.
32. Saio H., Ryabchikova T., Sachkov M. Pulsations in the atmosphere of the roAp star HD24712 — II. Theoretical models // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2010. — Vol. 403. — P. 1729—1738. 0912.4401.
33. Smalley B., Kurtz D. W., Smith A. M. S. et al. SuperWASP observations of pulsating Am stars // Astron. Astrophys. — 2011. — Vol. 535. — P. A3. 1107.0246.

## ХИМИЯ В ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКАХ

В данной обзорной лекции обсуждается текущее понимание того, как происходит химическая эволюция в протопланетных дисках — аналогах нашей Солнечной системы, когда ей было всего несколько миллионов лет. На этой стадии эволюции, когда в таких системах начинают образовываться планеты, сильные градиенты плотности, температуры и интенсивности ионизирующего излучения приводят к образованию «слоистой» химической структуры. В горячей, разреженной и сильно ионизованной атмосфере присутствуют только лишь атомы, атомарные ионы и простые фотостабильные радикалы, чья химическая эволюция определяется ограниченным набором газофазных реакций. В более глубоких слоях диска рентгеновское и ультрафиолетовое межзвездное и звездное излучение начинает ослабляться за счет поглощения пылью и газом, температура понижается, позволяя образовываться множеству сложных соединений посредством газопылевой химии. Наконец, в темной, холодной и плотной экваториальной части диска большинство молекул успевает вымерзнуть за время жизни диска, образуя сложные ледяные мантии на пылинках, на которых происходит образование сложных (органических) молекул за счет поверхностных реакций.

In this lecture I discuss recent progress in the understanding of the chemical evolution of protoplanetary disks that resemble our Solar system during the first ten million years. At the verge of planet formation, strong variations of temperature, density, and radiation intensities in these disks lead to a layered chemical structure. In hot, dilute and heavily irradiated atmosphere only simple radicals, atoms, and atomic ions can survive, formed and destroyed by gas-phase processes. Beneath the atmosphere a partly UV-shielded, warm molecular layer is located, where high-energy radiation drives rich chemistry, both in the gas phase and on dust surfaces. In a cold, dense, dark disk mid-plane many molecules are frozen out, forming thick icy mantles where surface chemistry is active and where complex (organic) species are synthesized.

## Введение

Протопланетные диски обнаружены вокруг множества молодых звезд в Галактике [1]. Это относительно небольшие ( $\sim 10\text{--}1\,000$  а. е.), маломассивные ( $\lesssim 10\%$  массы Солнца) и короткоживущие ( $\lesssim 1\text{--}10$  млн лет) вращающиеся объекты, состоящие преимущественно из газа и небольшого ( $\sim 1\%$ ) количества пыли. Их химический состав, а также физические условия обуславливают скорость и эффективность образования планет, которое зависит от температуры и распределения плотности газа, непрозрачности среды и наличия турбулентности. Более того, некоторые молекулы и пылевые частицы являются важными для нагрева и охлаждения газа ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{OH}$ , полиароматические углеводороды), в то время как маленькая ( $\lesssim 1\text{--}10$  мкм) пыль определяет степень непрозрачности диска для излучения.

За последнее десятилетие наши знания о протопланетных дисках, в особенности об их химическом составе, значительно продвинулись вперед. Молекулярный водород — главный компонент газа, будучи симметричной молекулой без постоянного дипольного момента, ненаблюдаем в дисках при температурах ниже около 500 К, поэтому вместо  $\text{H}_2$  приходится использовать другие, гораздо менее распространенные молекулы (табл. 1). Их вращательные эмиссионные переходы наблюдаются обычно в миллиметровом диапазоне длин волн, а колебательные или колебательно-вращательные — в инфракрасном. Преимущество наблюдений в (суб-)миллиметровом диапазоне — наличие огромного числа молекулярных линий, а также относительная прозрачность земной атмосферы.

Главная трудность таких наблюдений — относительно малый угловой размер даже самых больших и близких протопланетных дисков ( $\lesssim 10''$  для диска вокруг ДМ Тельца), что требует радиоинтерферометрических наблюдений для получения карт распределения излучения в линиях молекул по объекту, например, с помощью интерферометра Плато де Бюр (Plateau de Bure interferometer) во Франции и Субмиллиметрового интерферометра (Submillimeter Array) в США. Зачастую, чтобы оценить общее количество молекул и интенсивность излучения их линий в каком-либо диске, используют наблюдения низкого разрешения на крупных радиотелескопах в широком ( $> 1\text{--}8$  ГГц) диапазоне частот, например, 30-м антенне IRAM (ESO, Испания), 12-м антенне APEX (ESO, Чили) и 15-м антенне телескопа Джеймса Клерка Максвелла (James Clerk Maxwell Telescope, Гавайи).

Таблица 1. Молекулярные линии — индикаторы условий в протопланетных дисках

Молекула	Параметр	Центральный слой	Молекулярный слой	Атмосфера	Зона планет
$^{12}\text{CO}$ , $^{13}\text{CO}$	Температура	мм*	мм	мм	ИК
$\text{H}_2$	Температура	0	0	0	ИК
$\text{NH}_3$	Температура	см	см	0	0
$\text{CS}$ , $\text{H}_2\text{CO}$	Плотность	0	мм	0	ИК
$\text{CCN}$ , $\text{HCN}$ , $\text{CN}$	Ионизирующее излучение	0	мм	0	ИК
$\text{HCO}^+$	Степень	0	мм	0	0
$\text{N}_2\text{H}^+$	ионизации	мм	0	0	0
$\text{C}^+$		0	0	ИК	ИК
Сложная органика	Поверхностные процессы	ИК**	ИК-см	0	ИК, мм
$\text{DCO}^+$ , $\text{DCN}$ ,	Изотопное	мм	мм	0	0
$\text{H}_2\text{D}^+$	фракционирование				

\* «мм/см» и «ИК» обозначают наблюдения в радио- и инфракрасном диапазонах соответственно.

\*\* Сложная органика, вымороженная или образованная в ледяных мантиях пылинок, может быть обнаружена в виде слабых линий поглощения на фоне сильного ИК-излучения центральной звезды. В газовой фазе ее легче всего наблюдать в радиодиапазоне, на (суб-)миллиметровых длинах волн.

Другая трудность состоит в том, что анализ эмиссионных молекулярных линий, к сожалению, требует построения априорной модели о распределениях температуры, плотности и химических концентраций по диску, а также моделирования переноса излучения (зачастую используется приближение локального термодинамического равновесия, ЛТР). В случае необходимости точного моделирования переноса в линиях для какой-то выбранной молекулы надо еще где-то найти данные о столкновительных сечениях для разных переходов, например в Leiden Atomic and Molecular DAtabase (LAMDA [2]). Таким образом, цикл определения различных параметров дисков требует реалистичную модель объекта, а также его (интерферометрических) наблюдений в линиях диагностических молекул, да еще и в разных переходах, которые возбуждаются при определенном диапазоне температур и плотностей. Используя такой трудоемкий (обычно итеративный) подход, удастся оценить столь важные параметры дисков, как радиальные и вертикальные распределения температуры и плотности газа, а также реконструировать поле скоростей и лучевую концентрацию излучающих молекул и степень их вымерзания в холодных частях диска (см. обзоры [3] и [4]). До недавнего времени таким способом можно было изучать внешние части дисков,  $\gtrsim 50$ —200 а. е. С помощью космических («Спитцер», «Гершель») и наземных (Кек, VLT, Субару) телескопов молекулы впервые были обнаружены во внутренних частях протопланетных дисков, 1—50 а. е., где в последующем будут образовываться (либо уже образуются) планетные системы (см., например, [5, 6]).

Протопланетные диски обычно частично непрозрачны для фотонов с длиной волны меньше  $\sim 100$  мкм. Поэтому используют наблюдения теплового излучения пыли в континууме на миллиметровых длинах волн, чтобы оценить массу дисков (с большой погрешностью из-за неизвестного соотношения массы пыли к массе газа и величины непрозрачности). Также удастся определить степень роста пылевых частиц посредством сравнения интенсивности теплового излучения пыли на инфракрасных, миллиметровых и сантиметровых длинах волн — если рост есть, то падение интенсивности с длиной волны происходит медленнее. Таким образом было обнаружено, что во многих дисках существуют как минимум «пылинки» миллиметрового и сантиметрового размера [7].

Наблюдения в инфракрасном диапазоне с поверхности Земли сильно ограничены атмосферными окнами прозрачности, а потому требуют космических телескопов. Однако посредством инфра-

красной спектроскопии удастся узнать многое о минералогическом составе пыли в дисках. Так, было найдено, что в составе пыли в дисках присутствуют аморфные углеродистые соединения (неизвестной природы), аморфные и кристаллические силикаты (например,  $\text{MgSiO}_3$  and  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) и сложные молекулярные льды, включающие органические вещества (например,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ). Изучая форму силикатных эмиссионных полос на 10 и 20 мкм, удалось показать, что в дисках присутствуют силикаты с различными соотношением Mg и Fe, размерами от субмикронных до нескольких микрон, а также различной степенью кристалличности, которая может еще и изменяться по диску [8].

К счастью, дополнительная информация об условиях, в которых образуются планеты, может быть получена путем детального анализа химического, минералогического и петрологического состава разнообразных образцов материалов, из которых состоят метеориты и частицы кометной/зодиакальной пыли [9]. Недавняя успешная космическая миссия «Стардаст» (Stardust) позволила впервые получить и привезти на Землю образцы межзвездной и кометной пыли, оставшейся со времен образования Солнечной системы, анализ которых показал присутствие силикатных веществ, кристаллизовавшихся при высокой ( $\gtrsim 800$  K) температуре, которые внедрены в низкотемпературные конденсаты [10]. Присутствие кристаллических силикатов было также обнаружено в протопланетных дисках вокруг других звезд [11, 12]. Более того, в составе кометной пыли были обнаружены сложные органические соединения, включая простейшую аминокислоту глицин [13]. Изотопный анализ различных минералов в старейших метеоритах показал, что большинство элементов (за исключением изотопов кислорода) обладают похожим изотопным составом, что предполагает эффективное перемешивание вещества во внутренней части Солнечной туманности в течение первых нескольких миллионов лет ее существования [14].

Все эти интересные факты отчасти объясняются современными моделями химической эволюции протопланетных дисков [15–19]. Наиболее важный теоретический результат, частично подтвержденный наблюдениями, предсказывает «слоистое» распределение молекул по диску. При этом в холодных внешних экваториальных частях дисков молекулы прилипают и постепенно вымерзают на пыли, образуя протяженные ледяные мантии сложного состава, в то время как в ионизированной атмосфере диска молекулы «разбиваются» ультрафиолетовым излучением молодой и активной звезды. Также

современные химические модели дисков позволяют качественно и количественно объяснить наблюдаемые величины лучевых концентраций таких веществ, как CO, HCO<sup>+</sup>, N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, CN, HCN, HNC, CS.

## Молекулы как инструмент изучения протопланетных дисков

К сегодняшнему моменту было найдено  $\sim 160$  химических соединений в космосе (см. <http://astrochemistry.net/>). Из них в дисках, ввиду относительной малой массы излучающего газа, были обнаружены только лишь CO (и его изотопологи), а также HCO<sup>+</sup>, DCO<sup>+</sup>, CN, HCN, DCN, CCH, H<sub>2</sub>CO и CS ([20–24]). К тому же соответствующие молекулярные спектры имеют обычно низкое соотношение сигнал/шум и пространственное разрешение. Соответственно радиальное распределение молекулярных обилий по дискам также определяется с большой погрешностью [25–27]. Путем тщательных и трудоемких наблюдений на таких первоклассных инструментах, как интерферометр Плато де Бюр (Plateau de Bure interferometer) во Франции и Субмиллиметрового интерферометра (Submillimeter Array) в США, были изучены несколько наиболее крупных, ярких и близких к нам протопланетных дисков вокруг звезд ДМ Тельца (DM Tau), Лкца 15 (LkCa 15), АБ Возничего (AB Aur) и ТВ Гидры (TW Hya). В 2013 г. на полную мощность должен начать работать Большой миллиметровый интерферометр в высокогорной пустыне Атакама, Чили (Atacama Large Millimeter Array; ALMA). С вводом в строй этого инструмента, гораздо более чувствительного, обладающего разрешающей способностью вплоть до 0.005 угловых секунд и способного наблюдать молекулы в широком диапазоне частот (96–850 ГГц) с высоким частотным разрешением, изучение химического состава и физических условий в протопланетных дисках выйдет на принципиально другой уровень, позволяя детально изучать большое количество объектов, включая маленькие и далекие системы, в линиях таких соединений, о которых мы можем сегодня только мечтать.

Методика изучения протопланетных дисков посредством наблюдений и моделирования эмиссионных линий молекул обычно начинается с изучения физических условий в ярких линиях монооксида углерода, CO. Эти линии легко возбуждаются уже при таких низких плотностях газа, как  $\sim 10^3$ – $10^4$  см<sup>-3</sup>, а потому в плотных протопланетных дисках заселенность уровней CO соответствует ЛТР. Линии главного изотополога <sup>12</sup>C<sup>16</sup>O — оптически толстые и наиболее яркие,

поэтому, измеряя их интенсивности, можно оценить кинетическую температуру газа в верхних областях дисков, а также поле скоростей, ориентацию и геометрию [20]. Эмиссионные линии менее обильных изотопов,  $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$  и  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ , обычно оптически тонкие или частично оптически толстые. Их интенсивности чувствительны одновременно к температуре газа и поверхностной плотности этих молекул. Изучая кинематику газа в этих линиях, было установлено, что в дисках есть турбулентность, с типичными дозвуковыми скоростями движений  $\sim 0.05\text{--}0.2 \text{ км с}^{-1}$  [28, 29].

Было найдено, что размер дисков зависит от того, каким способом его оценивают: самые маленькие величины получаются из наблюдений теплового излучения пыли, в то время как в линиях  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ ,  $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$  и  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$  диски кажутся все более и более крупными, вплоть до радиусов в 300—1000 а. е. Достоверно оценить радиус дисков из наблюдений теплового излучения пыли пока не представляется возможным из-за того, что не хватает чувствительности радиотелескопов. Для изотопологов CO разница в оценках размеров обусловлена частично нехваткой чувствительности телескопов, частично — селективной (изотопной) фотодиссоциацией, при которой основной изотополог,  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ , разрушается медленнее, чем менее распространенные изотопологи  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$  и  $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ . Также было получено, что большинство дисков обладают градиентом кинетической температуры газа в вертикальном направлении, как и предсказывается современными моделями, с температурами около 10 K в центральной области и 50 K — в молекулярном слое [23, 30, 31]. Есть и исключения, а именно сильно проэволюционировавшие диски с более однородным распределением температуры из-за их особенной физической структуры, в который одновременно присутствуют маленькие пылинки во внешней части, и большие пылинки (а может, уже и планетозимали) во внутренней части, например ГМ Возничего (GM Aur) и Лкца 15 (LkCa 15) [32, 33]. В одном массивном и протяженном диске у ДМ Тельца было обнаружено присутствие очень холодных ( $\sim 10\text{--}15 \text{ K}$ ) газов, таких, как CO, CCH,  $\text{HCO}^+$ , CN, HCN. Данный факт пока не может быть достоверно объяснен в рамках современных астрохимических моделей.

Для молекул с большим дипольным моментом, чем у CO (0.112 Дебая), требуется более высокая плотность газа для возбуждения вращательных переходов. После линий монооксида углерода,  $\text{HCO}^+$  (с дипольным моментом 3.92 Дебая) — вторая наиболее легко наблюдаемая химическая специя в дисках. Вращательные переходы



этого иона термализуются уже при плотностях газа около  $10^5 \text{ см}^{-3}$  и чувствительны к плотности газа. Это один из самых распространенных ионов в протопланетных дисках (другие ионы, не наблюдаемые в радиодиапазоне, это  $\text{C}^+$  и  $\text{H}_3^+$ ). Иногда в дисках удается наблюдать линии  $\text{N}_2\text{H}^+$  (дипольный момент 3.37 Дебая). Используя наблюдения этих двух ионов, было установлено, что степень ионизации молекулярного слоя диска составляет  $\sim 10^{-10}$ — $10^{-9}$ , как и предсказывается химическими моделями. Этой величины достаточно для эффективного взаимодействия газа и магнитного поля и, таким образом, для образования турбулентности в дисках [26].

Линии остальных молекул и ионов еще менее яркие и требуют большого количества наблюдательного времени даже на самых чувствительных интерферометрах. Например, было установлено, что отношение интенсивностей линий  $\text{C}_2\text{H}$  и  $\text{CN}$  к  $\text{HCN}$  зависит от интенсивности и формы УФ-спектра звезды [34]. То есть, чем выше интенсивность УФ-излучения звезды, тем более обильными становятся радикалы  $\text{C}_2\text{H}$  и  $\text{CN}$ ;  $\text{DCO}^+$  и  $\text{DCN}$  имеют относительно высокие концентрации по сравнению с основными изотопологами  $\text{HCO}^+$  и  $\text{HCN}$ ,  $\sim 1$ — $10$  %, хотя космическое отношение элементов D/H составляет только около  $10^{-5}$  [35]. Пока непонятно, что обуславливает такую высокую степень фракционирования дейтерия в этих молекулах: это может быть «наследие» химической эволюции в холодных молекулярных облаках или же такие процессы могут эффективно протекать в холодных частях дисков.

Один из наиболее важных наблюдательных результатов, касающихся химического состава протопланетных дисков, состоит в том, что измеренные обилия молекул оказываются систематически в 5—100 раз ниже, чем в молекулярных облаках в области маломассивного звездообразования в Тельце [28]. Это объясняется более сильным вымораживанием газофазных молекул в холодных и плотных центральных областях дисков, а также их быстрой фотодиссоциацией в сильноионизированной атмосфере. Присутствие большого количества льдов в холодных частях дисков было обнаружено с помощью Инфракрасной космической обсерватории (Infrared Space Observatory; ISO) и телескопа «Спитцер» [8, 36]. В основном они состоят из воды с примесью ( $\sim 1$ — $30$  %) более сложных соединений, например,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{CO}$ ,  $\text{HCOOH}$  [37]. С помощью «Спитцера» были найдены колебательно-вращательные и колебательные линии таких молекул, как  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{OH}$ , которые для возбуждения требуют температур выше  $\sim 300$ — $1\,000$  К. Бы-

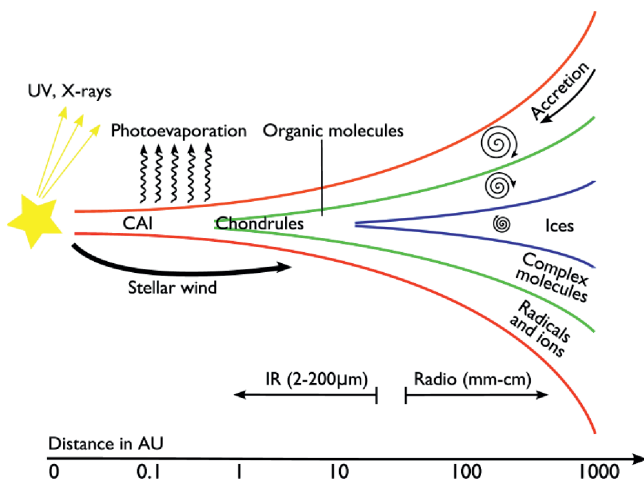


Схема предполагаемой физической и химической структуры протопланетного диска вокруг молодой маломассивной звезды типа Солнца (расстояния показаны не в масштабе) (рисунок из работы [40])

ло обнаружено, что отношение интенсивностей линий HCN к  $C_2H_2$  чувствительно к интенсивности ионизирующего излучения звезды. С помощью телескопа «Гершель» начались подробные исследования химического состава атмосферы дисков, в частности, путем наблюдений инфракрасных переходов  $CH$  (158 мкм) и  $OI$  (63 мкм), а также линий легких ионов ( $CH^+$ ,  $OH^+$ ,  $H_2O^+$ ,  $HS^+$ ) [38, 39].

В табл. 1 приведены наблюдаемые молекулярные линии, которые используются для исследования физических условий в разных областях протопланетных дисков.

## Общая схема химической структуры протопланетного диска

Общая схема структуры протопланетного диска у маломассивной звезды показана на рисунке.

Перенос и сохранение углового момента в протопланетном диске за счет турбулентной вязкости газа обуславливает его динамическую («вязкую») эволюцию. При этом значительная доля вещества ( $\sim 80\%$ ) переносится к звезде, а остальное вещество уносит угло-

вой момент наружу. Этот процесс приводит к тому, что радиальное распределение поверхностной плотности по диску может быть с хорошей точностью описано степенным законом, с показателем степени около  $-3/2$ . Для модели Солнечной туманности [41] поверхностная плотность на 1 а. е. составляет около  $1\,700\text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$ . В вертикальном направлении плотность диска падает экспоненциально, в то время как температуры пыли и газа растут, причем, начиная с некоторой высоты, газ становится горячее, чем пыль (из-за менее эффективного охлаждения и нагрева интенсивным излучением центральной звезды). Также температура возрастает по направлению к звезде, причем на расстояниях  $\lesssim 0.1$  а. е., где температура становится выше  $1\,500\text{--}2\,000\text{ К}$ , начинается испарение пыли. Испарение льдов начинается гораздо раньше, на расстоянии  $\sim 3$  а. е. ( $T \sim 100\text{--}150\text{ К}$ ) испаряется водяной лед, а на  $\sim 20\text{--}50$  а. е. ( $T \sim 20\text{ К}$ ) испаряется СО лед.

Проникновение в диск ионизирующего УФ- и рентгеновского излучения звезды определяется поглощающими и рассеивающими свойствами пыли, а также распределением плотности газа и энергией фотона/частицы. Так, например, УФ-излучение почти полностью блокируется лучевой концентрацией вещества  $\lesssim 0.01\text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$  (атмосфера и верхняя часть молекулярного слоя), в то время как для жестких рентгеновских фотонов ( $1\text{--}5\text{ кэВ}$ ) эта величина составляет  $0.1\text{--}1\text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$  (атмосфера и молекулярный слой), а для релятивистских частиц космических лучей  $100\text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$  (практически весь диск).

Соответственно с химической точки зрения весь диск может быть поделен на четыре основные области (характеризуемые в основном различной температурой и интенсивностью ионизирующего излучения). Внутренняя область соответствует области образования планетной системы (с радиусами  $\lesssim 20\text{--}50$  а. е.), которая доступна для наблюдений с помощью высококлассных инфракрасных телескопов (и в будущем с ALMA). Внешняя область диска ( $\gtrsim 20\text{--}50$  а. е.) доступна для наблюдений в радиодиапазоне с современными интерферометрами и, в свою очередь, состоит из трех вертикальных слоев: экваториального (центрального), теплого молекулярного слоя и атмосферы.

Плотная ( $> 10^8\text{ см}^{-3}$ ) экваториальная часть полностью непрозрачна для внешнего ионизирующего излучения (ИК, рентген) из-за поглощения пылью, а потому остается холодной ( $10\text{--}20\text{ К}$ ) и практически химически нейтральной. Химические процессы в этой части диска сначала протекают в газовой фазе за счет быстрых ион-

молекулярных реакций, но, вследствие постепенного вымораживания молекул на пыль, основную роль начинают играть медленные поверхностные реакции (в основном с участием радикалов и атомов водорода). Молекулы, образованные на пылинках или прилипшие к ним, едва ли могут десорбировать обратно в газ. Характерное время химических процессов в холодной центральной области диска определяется медленными поверхностными реакциями и составляет около  $> 10^5\text{--}10^6$  лет (для радиусов  $\sim 100\text{--}300$  а. е.). Ближе к звезде центральная область диска («внутренняя область») становится горячее ( $> 100$  К), в том числе и из-за аккреционного нагрева, что сводит роль химии льдов на нет, и характерное химическое время становится коротким ( $\sim 100$  лет). Поэтому в той части диска, где образуются планеты, химические процессы находятся в равновесии, что позволяет серьезно упростить их моделирование путем использования термодинамических моделей.

Сразу над центральной областью находится более теплый ( $T \sim 30\text{--}70$  К), менее плотный ( $\sim 10^6\text{--}10^7$  см $^{-3}$ ), частично облучаемый ионизирующим излучением молекулярный слой. Химическая эволюция в этой части диска определяется в основном эффективными взаимодействиями между процессами, протекающими в газе и на поверхности пыли, и регулируется УФ- и рентгеновским излучением центральной звезды [3]. Образование сильного УФ-поля нетепловой природы в звездах типа Т Тельца связано с их повышенной хромосферной активностью и аккрецией вещества диска на звезду [42]. Подобным же образом генерируется низкоэнергетическое рентгеновское излучение, в то время как более жесткий рентген образуется в горячих аккреционных джетах и за счет вспышечной активности молодой звезды (наподобие солнечной активности, только в тысячи раз более сильной) [43]. Рентгеновские и УФ-фотоны ионизируют газ, приводят к диссоциации молекул в газе и выбивают их с поверхности пылинок. Повышенное количество сложных ионов и радикалов, а также постоянный обмен веществом между газом и ледяными мантиями обуславливают богатый химический состав теплого молекулярного слоя. В нем относительные концентрации многих молекул достигают своего пика, и большинство эмиссионных линий образуется именно здесь. Из-за большого числа разнообразных химических процессов, активных в молекулярном слое, время достижения химического равновесия сопоставимо или даже превышает жизни протопланетного диска,  $> 1$  млн лет.

Наконец, над молекулярным слоем находится горячая ( $T \sim 100\text{--}10\,000\text{ K}$ ), разреженная ( $\lesssim 10^5\text{ см}^{-3}$ ) и сильно ионизованная атмосфера диска. В ней практически нет никаких молекул и сложных ионов, за исключением молекулярного водорода и таких фотостабильных радикалов, как CCH и CN. Химические процессы в атмосфере протекают исключительно в газе и состоят из фотореакций и реакций диссоциативной рекомбинации. Характерное время химической эволюции атмосферы диска составляет всего  $\sim 100$  лет (для  $\sim 100\text{--}300$  а. е.).

В следующих разделах обзора более подробно рассказывается о разных типах химических процессов, активных в четырех основных областях протопланетных дисков.

## Газофазная химия

Современные астрохимические модели содержат данные о тысячах реакций, которые могут быть активны в космических условиях [44–46]. К сожалению, только лишь 10–20 % из них хорошо изучены в лаборатории или путем сложных квантово-механических расчетов. Поэтому не стоит забывать о том, что результаты любого астрохимического моделирования обладают внутренне-обусловленными неточностями с ошибками в расчетных концентрациях в несколько раз [47, 48]. Все эти тысячи реакций могут быть поделены на четыре основные группы, которые соответствуют четырем химическим регионам диска (см. табл. 2, адаптированную из [49]).

Почти во всем диске большинство активных химических реакций — это кинетические процессы первого (например, молекула плюс фотон) или второго (например, ион плюс молекула) порядков. В самой внутренней части диска, при плотностях, превышающих  $\sim 10^{10}\text{ см}^{-3}$ , становятся активными также трехчастичные процессы (например, молекула плюс молекула плюс молекула). Основными процессами, благодаря которым начинается образование молекулярных связей, являются медленные реакции радиативной ассоциации и поверхностные реакции. С некоторой вероятностью столкновения в газе могут привести к образованию так называемого столкновительного комплекса, находящегося в возбужденном состоянии, который либо стабилизируется путем переизлучения избытка энергии фотоном(-ами), либо снова распадается [50]. Например, образование углеродных цепочек начинается с радиативной ассоциации между  $\text{C}^+$  и  $\text{H}_2$  в  $\text{CH}_2^+$  [51].

Таблица 2. Типы химических процессов, активных в протопланетных дисках

Процесс	Формула	Центральный слой	Молекулярный слой	Атмосфера	Зона планет
<b>Образование связей</b>					
Радиятивная ассоциация	$A + B \rightarrow AB + h\nu$	X	X	X	X
Поверхностная реакция	$A + B \parallel gr \rightarrow AB + gr$	X	X	0	0
Трехчастичная реакция	$A + B + M \rightarrow AB + M$	0	0	0	X
<b>Разрушение связей</b>					
Фотодиссоциация	$AB + h\nu \rightarrow A + B$	0	X	X	X
Диссоциация космическими лучами	$AB + CRP \rightarrow A + B$	X	X	0	0
Диссоциация рентгеном	—	0	X	X	X
Диссоциативная рекомбинация	$AB^+ + e^- \rightarrow A + B$	X	X	X	X
<b>Обмен связями</b>					
Нейтраль-нейтральная реакция	$A + BC \rightarrow AB + C$	X	X	0	X
Ион-молекулярная реакция	$A^+ + BC \rightarrow AB^+ + C$	X	X	X	X
Перераспределение заряда	$A^+ + BC \rightarrow A + BC^+$	X	X	X	X
<b>Сохранение связей</b>					
Фотоионизация	$AB + h\nu \rightarrow AB^+ + e^-$	0	X	X	X
Ионизация космическими лучами	$AB + CRP \rightarrow AB^+ + e^-$	X	X	0	0
Ионизация рентгеном	—	0	X	X	X

Далее, вновь образованные молекулы и ионы начинают реагировать друг с другом посредством быстрых ион-молекулярных реакций. Эти реакции экзотермичны, т. е. протекают с выделением тепла, не обладают энергетическими барьерами и обладают большими коэффициентами скоростей,  $\sim 10^{-9} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ , которые зачастую увеличиваются при уменьшении температуры за счет кулоновского притяжения между ионом и центром заряда молекулы [52]. Ион-молекулярные реакции приводят к перераспределению молекулярных связей между реагентами. Этот тип химических процессов составляет наибольшую долю реакций в астрохимических моделях.

С другой стороны, молекулярные ионы могут сталкиваться с электронами или заряженными пылинками, диссоциативно рекомбинировать и распадаться на несколько фрагментов. Эти процессы тоже проходят с выделением энергии, которая превращается в кинетическую энергию продуктов диссоциации. Типичные константы скоростей реакций диссоциативной рекомбинации составляют около  $10^{-7} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$  при 10 K [45]. Практически для всех наблюдаемых молекул в дисках реакции диссоциативной рекомбинации являются важным каналом их образования (например, для воды и углеводородных цепочек). Зачастую на поздних этапах эволюции диска,  $\gtrsim 10^5$  лет, скорость разрушения многоатомных ионов за счет диссоциативной рекомбинации уравнивается реакцией протонирования, т. е. добавлением протона за счет ион-молекулярной реакции с  $\text{H}_3^+$ . Например, процесс  $\text{CO} + \text{H}_3^+ \rightarrow \text{HCO}^+ + \text{H}_2$  уравнивается реакцией  $\text{HCO}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{CO} + \text{H}$ . К сожалению, не так просто точно теоретически предсказать или измерить в лаборатории то соотношение обилий разных фрагментов, на которое распадается сложный молекулярный ион [53].

Относительно недавно было показано, что некоторое количество нейтраль-нейтральных реакций, включающих радикалы, могут быть активными в космических условиях [54]. Константы скоростей этих процессов составляют  $\sim 10^{-11} - 10^{-10} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ , что всего лишь на несколько порядков меньше, чем в случае быстрых ион-молекулярных реакций [55]. Одна из наиболее важных реакций такого типа в протопланетных дисках приводит к образованию  $\text{HCO}^+$  из O и CH.

## Фотохимические процессы

Молодые звезды типа Т Тельца ( $T_{\text{eff}} \simeq 4000 \text{ K}$ ) обладают мощным УФ-полем, спектр которого отличается от спектра межзвездного УФ-излучения, в частности наличием сильной эмиссионной линии Лайман-альфа (121.6 нм [34]). Интегральная интенсивность УФ-излучения на расстоянии 100 а. е. от такой звезды может более чем в сотни раз превышать интенсивность межзвездного УФ-поля [56]. Разрушение молекул ультрафиолетовыми фотонами может происходить несколькими путями, в частности, либо за счет поглощения фотонов определенных энергий, либо за счет поглощения в континууме, либо сразу за счет обоих механизмов. При этом важную роль играет распределение поглощающей УФ-пыли (суб-)микронного размера по диску, которое может значительно изменить эффективность проникновения ионизирующего излучения во внутренние части [57]. Например, такие важные для изучения дисков, как CO,  $\text{H}_2$  и CN, разрушаются путем поглощения УФ-фотонов определенных энергий,  $\lambda \lesssim 1100 \text{ \AA}$ , а потому не чувствительны к наличию (или отсутствию) мощной эмиссионной линии Лайман-альфа в УФ-спектре. Другие спещии, например, HCN и  $\text{CH}_4$ , разрушаются УФ-фотонами меньших энергий, поэтому эффективность их фотодиссоциации зависит от интенсивности линии Лайман-альфа [49, 58]. Именно этим фактом объясняется наблюдаемое повышенное отношение концентрации CN к HCN в дисках [20, 34].

Так как диссоциация чрезвычайно распространенных молекул водорода и монооксида углерода происходит путем взаимодействия с УФ-фотонами определенных (высоких) энергий, ее эффективность зависит не только от количества поглощающих пылинок в среде, но и от количества самих  $\text{H}_2$  и CO на пути распространения УФ-излучения. Каждый процесс разрушения этих молекул приводит к «выеданию» энергии из УФ-спектра на определенных частотах, что, хотя и мало сказывается на полной интенсивности ультрафиолетового излучения, уменьшает вероятность диссоциации в последующих случаях (механизм самозащиты от фотодиссоциации, self-shielding). Для  $\text{H}_2$  и CO критическими лучевыми концентрациями газа для практически полной остановки фотодиссоциации являются  $\sim 10^{14}$  и  $\sim 10^{21} \text{ см}^{-2}$  соответственно [59, 60].

Однако это условие выполняется только для главных изотопологов  $\text{H}_2$  и  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ . Менее распространенные изотопологи HD,  $\text{D}_2$ ,  $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ ,  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ ,  $^{13}\text{C}^{18}\text{O}$ ,  $^{12}\text{C}^{17}\text{O}$  диссоциируют путем поглощения



УФ-фотонов немного других энергий, а потому механизм самозащиты от фотодиссоциации в дисках для них не работает (или эффективен лишь частично). Таким образом, получается, что в молекулярном слое и атмосфере диска соотношение обилий атомов  $^{12}\text{C}$  и  $^{13}\text{C}$ , а также изотопов кислорода может отличаться от изначального космического, что приводит к изотопно-селективной химии и измененным концентрациям изотопных соединений [49, 60, 61]. Именно такой изотопно-селективной УФ-диссоциацией (вкуче с динамической эволюцией) объясняется наличие аномальных соотношений изотопов кислорода в различных минералах, образованных на стадии образования Солнечной системы и входящих в состав метеоритного вещества [62].

В следующем разделе вкратце описываются взаимодействие молекул с пылью и поверхностная химия. Более подробное описание приведено в работе А. И. Васюнина в этом сборнике.

## **Взаимодействие газа с пылевыми частицами и поверхностные реакции**

В холодных ( $\lesssim 10\text{--}100\text{ K}$ ) областях протопланетных дисков многие молекулы успевают почти полностью осесть на пылевые частицы за несколько миллионов лет эволюции. При таких низких температурах молекулы прилипают (адсорбируют) при столкновениях к пылинкам почти со 100 % вероятностью, так как их кинетические энергии ( $\lesssim 100\text{ K}$ ) намного меньше энергий испарения (десорбции;  $\sim 600\text{--}6\,000\text{ K}$ ), табл. 3 [63]. Точно оценить вероятность сложно, так как она зависит от свойств поверхности (пористость, материал, поверхностный потенциал). Прилипание к поверхности происходит не хаотично, а в определенные участки с пониженным электростатическим потенциалом (участки адсорбции). На пылинке с радиусом

Таблица 3. Энергии десорбции для астрохимически важных молекул

Молекула	Энергия десорбции, К
C <sub>2</sub> H	2140*
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2590
C <sub>2</sub> S	2700
C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	3390
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	7590
CH <sub>2</sub> CO	2200
CH <sub>3</sub> CHO	2870
CH <sub>3</sub> OH	5530
CH <sub>4</sub>	1300
CN	1600
CO	1150
CO <sub>2</sub>	2580
CS	1900
H	624
H <sub>2</sub>	552
H <sub>2</sub> S	2740
H <sub>2</sub> CO	2050
H <sub>2</sub> O	5700
HCN	2050
HCOOH	5570
HNC	2050
HNCO	2850
HNO	2050
N	800
N <sub>2</sub>	1000
NH <sub>3</sub>	5530
NO	1600
O	800
O <sub>2</sub>	1000
OH	2850
S	1100
SO	2600
SO <sub>2</sub>	3400

\* Примерная температура, при которой начинается испарение молекулы из ледяной мантии, может быть получена путем деления энергии десорбции (в К) на 50.

0.1 мкм, состоящей преимущественно из аморфных силикатов, размещается около миллиона таких участков (со средним размером в несколько ангстрем).

Прилипание молекул может происходить двумя различными способами, за счет физической адсорбции (физисорбции) и химической адсорбции (хемосорбции). В первом случае молекула удерживается на поверхности за счет сил ван дер Ваальса, а во втором — за счет образования химической связи с молекулой поверхности. Энергия прилипания для физической адсорбции составляет всего лишь доли эВ (что соответствует 600—6 000 К, табл. 3), в то время как энергия химической адсорбции гораздо выше,  $\gtrsim 1$  эВ ( $\gtrsim 10$ —30 000 К). Также как и молекулы, к пылинкам могут прилипать электроны, что делает возможным реакции диссоциативной рекомбинации ионов на пыли. В самой темной, плотной и почти нейтральной части центральной области диска отрицательно заряженные пылевые частицы становятся наиболее распространенными носителями заряда [64].

Помимо адсорбции молекулы могут, при благоприятных условиях, десорбировать с поверхности. Конечно, для тех молекул, которые хемосорбировались на поверхность пылинки, вероятность десорбции обратно в газовую фазу невелика. Считается, что в протопланетных дисках реализуются три наиболее эффективных механизма десорбции (отлипания) льдов. Это тепловая десорбция, десорбция за счет нагрева пылинки релятивистской частицей космических лучей и десорбция ультрафиолетовыми фотонами.

Тепловая десорбция начинается, когда поверхностные молекулы нагреваются так, что их кинетическая энергия начинает превышать энергию прилипания (или энергию десорбции). Легкие простые молекулы, такие как СО и N<sub>2</sub>, начинают десорбировать при нагреве пылинки до 20 К [65], в то время как для воды, диоксида углерода и тяжелых соединений (углеродных цепочек, цианополиминов, органики) требуются температуры, превышающие  $\sim 50$ —150 К. Хемосорбированные молекулы начинают испаряться только при достижении температур  $\gtrsim 300$ —1 000 К. Очевидно, что тепловая десорбция очень важна для химической эволюции внутренней ( $\lesssim 1$ —10 а. е.) горячей области протопланетных дисков.

Во внешней холодной центральной области дисков работает другой механизм десорбции — десорбция за счет взаимодействия космических лучей с веществом. В состав космических лучей входит небольшая ( $< 1$  %) часть ядер железа релятивистских энергий ( $> 1$  GeV). Если такая высокоэнергичная частица сталкивается с пы-

линкой, то ее энергии хватает, чтобы нагреть последнюю до высокой температуры,  $\gtrsim 50$  К, позволяя импульсно испарить часть или всю ледяную мантию [66, 67]. Также частицы космических лучей (или «выбитые» ими быстрые электроны), сталкиваясь с молекулами водорода, вызывают их возбуждение, заставляя излучать УФ-фотоны, которые могут, в свою очередь, испарять поверхностные молекулы фотодесорбцией [68].

Фотодесорбция поверхностных специй важна для химических процессов в молекулярном слое дисков. При этом каждый УФ-фотон, попавший на поверхность ледяной мантии пылинки, может с какой-то вероятностью «отколоть» поверхностную специю. За последние несколько десятилетий лабораторные исследования позволили измерить эти вероятности для дюжины наиболее важных простых молекул. Эта вероятность (на каждый УФ-фотон) для  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{NH}_3$  составляет около  $10^{-4}$ — $10^{-2}$  и зависит от формы УФ-спектра [69–71].

Наконец, молекулы на поверхности при определенных условиях могут вступать в химические реакции друг с другом. При этом поверхность пылинки выступает в роли своеобразного катализатора реакций, поглощая выделяющееся тепло и позволяя реагентам накапливаться. Самая важная молекула во Вселенной,  $\text{H}_2$ , образуется из атомарного водорода практически всецело на поверхности пыли [66, 72]. Поверхностные реакции могут протекать несколькими способами. Если реагирующие молекулы физисорбированы, то при определенном диапазоне температур они могут перескакивать (или туннелировать в случае  $\text{H}$  и  $\text{H}_2$ ) в соседние участки адсорбции, так как потенциальные барьеры между ними обычно меньше, чем энергия десорбции. Таким образом, физисорбированные реагенты могут блуждать по поверхности и в конце концов прореагировать друг с другом, если обе молекулы оказываются на одном и том же участке адсорбции. Этот механизм химических реакций на поверхности называется механизмом Ленгмюра—Хиншельвуда, и в дисках он работает в центральной темной области. Существует еще один важный механизм химических реакций на поверхности, механизм Элей—Редила, когда один из радикалов хемосорбирован на поверхности, а другая газофазная молекула сталкивается с ним, образуя с некоторой вероятностью новую специю. Этот механизм особенно важен для углеродистых поверхностей и играет важную роль в поверхностной химии при высоких ( $\gtrsim 100$  К) температурах и/или интенсивной фотодиссоциации, т. е. в молекулярном слое диска. Лабораторные

исследования показали, что сложные молекулы, включая органику (например, метанол), могут эффективно образовываться в космических условиях в основном за счет поверхностной химии [73].

## Заключение

В данной обзорной лекции показано, как образуются и разрушаются молекулы в процессе эволюции протопланетных дисков — аналогах нашей Солнечной системы, когда ей было всего несколько миллионов лет. Молекулы являются важным инструментом изучения физических условий, кинематики и химической структуры дисков. На протопланетной стадии эволюции сильные градиенты плотности, температуры и интенсивности ионизирующего излучения приводят к образованию «слоистой» химической структуры. В горячей, разреженной и сильно ионизованной атмосфере присутствуют только лишь атомы, атомарные ионы и простые фотостабильные радикалы, чья химическая эволюция определяется ограниченным набором газофазных реакций. В более глубоких слоях диска рентгеновское и ультрафиолетовое межзвездное и звездное излучение начинает ослабляться за счет поглощения пылью и газом, температура понижается, позволяя образовываться множеству сложных соединений посредством газопылевой химии. Наконец, в темной, холодной и плотной экваториальной части диска большинство молекул успевает вымерзнуть за время жизни диска, образуя сложные ледяные мантии на пылинках, на которых происходит образование сложных (органических) молекул за счет поверхностных реакций. Вкратце сказано, какие основные факты о структуре дисков были получены в результате наблюдений на радио- и инфракрасных телескопах.

Работа выполнена при поддержке гранта Немецкого научного фонда в рамках приоритетной программы SPP 1385: «The first ten million years of the Solar system — a planetary materials approach» (SE 1962/1—1).

## Список библиографических ссылок

1. *Lissauer J. J.* Timescales for planetary accretion and the structure of the protoplanetary disk // *Icarus*. — 1987. — Vol. 69. — P. 249–265.
2. *Schöier F. L., van der Tak F. F. S., van Dishoeck E. F., Black J. H.* An atomic and molecular database for analysis of submillimetre line

- observations // *Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 432. — P. 369–379. [arXiv:astro-ph/0411110](#).
3. *Bergin E. A., Aikawa Y., Blake G. A., van Dishoeck E. F.* The Chemical Evolution of Protoplanetary Disks // *Protostars and Planets V* / Ed. by B. Reipurth, D. Jewitt, K. Keil. — 2007. — P. 751–766.
  4. *Semenov D., Chakraborty S., Thieme M.* Chemical and Isotopic Evolution of the Solar Nebula and Protoplanetary Disks // *Protoplanetary Dust: Astrophysical and Cosmochemical Perspectives* / Ed. by Apai, D. A. & Lauretta, D. S. — 2010. — P. 97–127.
  5. *Lahuis F., van Dishoeck E. F., Boogert A. C. A. et al.* Hot Organic Molecules toward a Young Low-Mass Star: A Look at Inner Disk Chemistry // *Astrophys. J., Lett.* — 2006. — Vol. 636. — P. L145–L148. [arXiv:astro-ph/0511786](#).
  6. *Salyk C., Pontoppidan K. M., Blake G. A. et al.* H<sub>2</sub>O and OH Gas in the Terrestrial Planet-forming Zones of Protoplanetary Disks // *Astrophys. J., Lett.* — 2008. — Vol. 676. — P. L49–L52. [arXiv:0802.0037](#).
  7. *Cortes S. R., Meyer M. R., Carpenter J. M. et al.* Grain Growth and Global Structure of the Protoplanetary Disk Associated with the Mature Classical T Tauri Star, PDS 66 // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 697. — P. 1305–1315. 0903.3801.
  8. *Bouwman J., Henning T., Hillenbrand L. A. et al.* The Formation and Evolution of Planetary Systems: Grain Growth and Chemical Processing of Dust in T Tauri Systems // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 683. — P. 479–498. 0802.3033.
  9. *Bradley J. P.* Interplanetary Dust Particles // *Meteorites, Comets and Planets: Treatise on Geochemistry, Volume 1* / Ed. by A. M. Davis, H. D. Holland, K. K. Turekian. — Elsevier B, 2005. — P. 689–+.
  10. *Brownlee D. E., Horz F., Newburn R. L. et al.* Surface of Young Jupiter Family Comet 81 P/Wild 2: View from the Stardust Spacecraft // *Science.* — 2004. — Vol. 304. — P. 1764–1769.
  11. *van Boekel R., Min M., Leinert C. et al.* The building blocks of planets within the ‘terrestrial’ region of protoplanetary disks // *Nature.* — 2004. — Vol. 432. — P. 479–482.
  12. *Juhász A., Bouwman J., Henning T. et al.* Dust Evolution in Protoplanetary Disks Around Herbig Ae/Be Stars—the Spitzer View // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 721. — P. 431–455. 1008.0083.
  13. *Elsila J. E., Glavin D. P., Dworkin J. P.* Cometary glycine detected in samples returned by Stardust // *Meteoritics and Planetary Science.* — 2009. — Vol. 44. — P. 1323–1330.

14. *Boss A. P.* Evolution of the Solar Nebula. VI. Mixing and Transport of Isotopic Heterogeneity // *Astrophys. J.* — 2004. — Vol. 616. — P. 1265–1277.
15. *Aikawa Y., Herbst E.* Molecular evolution in protoplanetary disks. Two-dimensional distributions and column densities of gaseous molecules // *Astron. Astrophys.* — 1999. — Vol. 351. — P. 233–246.
16. *van Zadelhoff G.-J., Aikawa Y., Hogerheijde M. R., van Dishoeck E. F.* Axi-symmetric models of ultraviolet radiative transfer with applications to circumstellar disk chemistry // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 397. — P. 789–802.
17. *Woods P. M., Willacy K.* Carbon Isotope Fractionation in Protoplanetary Disks // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 693. — P. 1360–1378. 0812.0269.
18. *Visser R., van Dishoeck E. F., Doty S. D., Dullemond C. P.* The chemical history of molecules in circumstellar disks. I. Ices // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 495. — P. 881–897. 0901.1313.
19. *Semenov D., Wiebe D.* Chemical evolution of turbulent protoplanetary disks and the Solar nebula // *ArXiv e-prints.* — 2011. — 1104.4358.
20. *Dutrey A., Guilloteau S., Guelin M.* Chemistry of protosolar-like nebulae: The molecular content of the DM Tau and GG Tau disks. // *Astron. Astrophys.* — 1997. — Vol. 317. — P. L55–L58.
21. *Aikawa Y., Momose M., Thi W.-F. et al.* Interferometric Observations of Formaldehyde in the Protoplanetary Disk around LkCa 15 // *Publ. Astron. Soc. Jpn.* — 2003. — Vol. 55. — P. 11–15. [arXiv:astro-ph/0211440](#).
22. *Thi W.-F., van Zadelhoff G.-J., van Dishoeck E. F.* Organic molecules in protoplanetary disks around T Tauri and Herbig Ae stars // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 425. — P. 955–972. [arXiv:astro-ph/0406577](#).
23. *Piétu V., Dutrey A., Guilloteau S.* Probing the structure of protoplanetary disks: a comparative study of DM Tau, LkCa 15, and MWC 480 // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 467. — P. 163–178. [arXiv:astro-ph/0701425](#).
24. *Henning T., Semenov D., Guilloteau S. et al.* Chemistry in Disks. III. Photochemistry and X-ray Driven Chemistry Probed by the Ethynyl Radical (CCH) in DM Tau, LkCa 15, and MWC 480 // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 714. — P. 1511–1520. 1003.5793.
25. *Piétu V., Guilloteau S., Dutrey A.* Sub-arcsec imaging of the AB Aur molecular disk and envelope at millimeter wavelengths: a non Keplerian disk // *Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 443. — P. 945–954. [arXiv:astro-ph/0504023](#).
26. *Dutrey A., Henning T., Guilloteau S. et al.* Chemistry in disks. I. Deep search for N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> in the protoplanetary disks around LkCa 15, MWC 480, and DM Tauri // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 464. — P. 615–623.

27. *Panić O., Hogerheijde M. R., Wilner D., Qi C.* A break in the gas and dust surface density of the disc around the T Tauri star IM Lupi // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 501. — P. 269–278. 0904.1127.
28. *Dutrey A., Guilloteau S., Ho P.* Interferometric Spectroimaging of Molecular Gas in Protoplanetary Disks // *Protostars and Planets V* / Ed. by B. Reipurth, D. Jewitt, K. Keil. — 2007. — P. 495–506.
29. *Hughes A. M., Wilner D. J., Andrews S. M. et al.* Empirical Constraints on Turbulence in Protoplanetary Accretion Disks // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 727. — P. 85–+. 1011.3826.
30. *Dartois E., Dutrey A., Guilloteau S.* Structure of the DM Tau Outer Disk: Probing the vertical kinetic temperature gradient // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 399. — P. 773–787.
31. *Isella A., Natta A., Wilner D. et al.* Millimeter Imaging of MWC 758: Probing the Disk Structure and Kinematics // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 725. — P. 1735–1741. 1010.3016.
32. *Dutrey A., Guilloteau S., Piétu V. et al.* Cavities in inner disks: the GM Aurigae case // *Astron. Astrophys.* — 2008. — Vol. 490. — P. L15–L18.
33. *Hughes A. M., Andrews S. M., Espaillat C. et al.* A Spatially Resolved Inner Hole in the Disk Around GM Aurigae // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 698. — P. 131–142. 0903.4455.
34. *Bergin E., Calvet N., D'Alessio P., Herczeg G. J.* The Effects of UV Continuum and Ly $\alpha$  Radiation on the Chemical Equilibrium of T Tauri Disks // *Astrophys. J., Lett.* — 2003. — Vol. 591. — P. L159–L162.
35. *Qi C., Wilner D. J., Aikawa Y. et al.* Resolving the Chemistry in the Disk of TW Hydrae. I. Deuterated Species // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 681. — P. 1396–1407. 0803.2753.
36. *van Dishoeck E. F.* ISO Spectroscopy of Gas and Dust: From Molecular Clouds to Protoplanetary Disks // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 42. — P. 119–167.
37. *Zasowski G., Kemper F., Watson D. M. et al.* Spitzer Infrared Spectrograph Observations of Class I/II Objects in Taurus: Composition and Thermal History of the Circumstellar Ices // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 694. — P. 459–478.
38. *Mathews G. S., Dent W. R. F., Williams J. P. et al.* GAS in Protoplanetary Systems (GASPS). I. First results // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. L127. 1005.3864.
39. *Thi W.-F., Ménard F., Meeus G. et al.* Detection of CH<sup>+</sup> emission from the disc around HD 100546 // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 530. — P. L2. 1104.2283.



40. *Semenov D.* Chemistry in Protoplanetary Disks // ArXiv e-prints. — 2010. 1011.4770.
41. *Hayashi C.* Structure of the solar nebula, growth and decay of magnetic fields and effects of magnetic and turbulent viscosities on the nebula // Progress of Theoretical Physics Supplement. — 1981. — Vol. 70. — P. 35–53.
42. *Bouvier J., Alencar S. H. P., Harries T. J. et al.* Magnetospheric Accretion in Classical T Tauri Stars // Protostars and Planets V. — 2007. — P. 479–494. [arXiv:astro-ph/0603498](#).
43. *Güdel M., Nazé Y.* X-ray spectroscopy of stars // Astron. Astrophys. Rev. — 2009. — Vol. 17. — P. 309–408. 0904.3078.
44. *Smith I. W. M., Herbst E., Chang Q.* Rapid neutral-neutral reactions at low temperatures: a new network and first results for TMC-1 // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2004. — Vol. 350. — P. 323–330.
45. *Woodall J., Agúndez M., Markwick-Kemper A. J., Millar T. J.* The UMIST database for astrochemistry 2006 // Astron. Astrophys. — 2007. — Vol. 466. — P. 1197–1204.
46. *Wakelam V.* KIDA: A Kinetic Database for Astrochemistry // American Astronomical Society Meeting Abstracts : American Astronomical Society Meeting Abstracts. — 2009. — Vol. 214. — P. 402.15+.
47. *Vasyunin A. I., Sobolev A. M., Wiebe D. S., Semenov D. A.* Influence of Uncertainties in the Rate Constants of Chemical Reactions on Astrochemical Modeling Results // Astronomy Letters. — 2004. — Vol. 30. — P. 566–576. [arXiv:astro-ph/0311450](#).
48. *Vasyunin A. I., Semenov D., Henning T. et al.* Chemistry in Protoplanetary Disks: A Sensitivity Analysis // Astrophys. J. — 2008. — Vol. 672. — P. 629–641. [arXiv:0709.3323](#).
49. *van Dishoeck E. F., Black J. H.* The photodissociation and chemistry of interstellar CO // Astrophys. J. — 1988. — Vol. 334. — P. 771–802.
50. *Herbst E., Klemperer W.* The Formation and Depletion of Molecules in Dense Interstellar Clouds // Astrophys. J. — 1973. — Vol. 185. — P. 505–534.
51. *Herbst E.* An update of and suggested increase in calculated radiative association rate coefficients // Astrophys. J. — 1985. — Vol. 291. — P. 226–229.
52. *Dalgarno A., Black J. H.* Molecule formation in the interstellar gas // Reports of Progress in Physics. — 1976. — Vol. 39. — P. 573–612.
53. *Spaniel P., Smith D.* A study of electron attachment to C<sub>70</sub> using the FALP technique // Chemical Physics Letters. — 1994. — Vol. 229. — P. 262–266.

54. *van Dishoeck E. F.* The Chemistry of Diffuse and Dark Interstellar Clouds // The Molecular Astrophysics of Stars and Galaxies / Ed. by T. W. Hartquist, D. A. Williams. — 1998. — Clarendon Press, Oxford. — P. 53–100.
55. *Clary D. C., Haider N., Husain D., Kabir M.* Interstellar carbon chemistry: Reaction rates of neutral atomic carbon with organic molecules // *Astrophys. J.* — 1994. — Vol. 422. — P. 416–422.
56. *Habing H. J.* The interstellar radiation density between 912 Å and 2400 Å // *Bull. Astron. Inst. Neth.* — 1968. — Vol. 19. — P. 421–431.
57. *Vasyunin A. I., Wiebe D. S., Birnstiel T. et al.* Impact of Grain Evolution on the Chemical Structure of Protoplanetary Disks // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 727. — P. 76–+. 1011.4420.
58. *van Dishoeck E. F., Jonkheid B., van Hemert M. C.* Photoprocesses in protoplanetary disks // Chemical evolution of the Universe / Ed. by I. R. Sims, D. A. Williams : Faraday discussion. — 2006. — Vol. 133. — P. 231–244.
59. *Draine B. T., Bertoldi F.* Structure of Stationary Photodissociation Fronts // *Astrophys. J.* — 1996. — Vol. 468. — P. 269–289.
60. *Visser R., van Dishoeck E. F., Black J. H.* The photodissociation and chemistry of CO isotopologues: applications to interstellar clouds and circumstellar disks // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 503. — P. 323–343. 0906.3699.
61. *Lee H.-H., Herbst E., Pineau des Forets G. et al.* Photodissociation of H<sub>2</sub> and CO and time dependent chemistry in inhomogeneous interstellar clouds. // *Astron. Astrophys.* — 1996. — Vol. 311. — P. 690–707.
62. *Lyons J. R., Young E. D.* CO self-shielding as the origin of oxygen isotope anomalies in the early solar nebula // *Nature.* — 2005. — Vol. 435. — P. 317–320.
63. *d'Hendecourt L. B., Allamandola L. J., Greenberg J. M.* Time dependent chemistry in dense molecular clouds. I - Grain surface reactions, gas/grain interactions and infrared spectroscopy // *Astron. Astrophys.* — 1985. — Vol. 152. — P. 130–150.
64. *Semenov D., Wiebe D., Henning T.* Reduction of chemical networks. II. Analysis of the fractional ionisation in protoplanetary discs // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 417. — P. 93–106.
65. *Bisschop S. E., Fraser H. J., Öberg K. I. et al.* Desorption rates and sticking coefficients for CO and N<sub>2</sub> interstellar ices // *Astron. Astrophys.* — 2006. — Vol. 449. — P. 1297–1309. [arXiv:astro-ph/0601082](#).
66. *Watson W. D., Salpeter E. E.* Molecule Formation on Interstellar Grains // *Astrophys. J.* — 1972. — Vol. 174. — P. 321–340.

67. *Leger A., Jura M., Omont A.* Desorption from interstellar grains // *Astron. Astrophys.* — 1985. — Vol. 144. — P. 147–160.
68. *Prasad S. S., Tarafdar S. P.* UV radiation field inside dense clouds - Its possible existence and chemical implications // *Astrophys. J.* — 1983. — Vol. 267. — P. 603–609.
69. *Öberg K. I., van Dishoeck E. F., Linnartz H.* Photodesorption of ices I: CO, N<sub>2</sub>, and CO<sub>2</sub> // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 496. — P. 281–293.
70. *Öberg K. I., Linnartz H., Visser R., van Dishoeck E. F.* Photodesorption of Ices. II. H<sub>2</sub>O and D<sub>2</sub>O // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 693. — P. 1209–1218.
71. *Fayolle E. C., Bertin M., Romanzin C. et al.* CO Ice Photodesorption: A Wavelength-dependent Study // *Astrophys. J., Lett.* — 2011. — Vol. 739. — P. L36. 1109.0281.
72. *Hollenbach D., Salpeter E. E.* Surface Recombination of Hydrogen Molecules // *Astrophys. J.* — 1971. — Vol. 163. — P. 155–164.
73. *Geppert W. D., Hellberg F., Österdahl F. et al.* Dissociative Recombination of CD 3 OD 2 + // *Astrochemistry: Recent Successes and Current Challenges* / Ed. by D. C. Lis, G. A. Blake, E. Herbst : IAU Symposium. — 2005. — Vol. 231. — P. 117–124.

## **«ОДНОЙ ЗВЕЗДЫ Я ПОВТОРЯЮ ИМЯ...»**

В лекции рассказывается о последних достижениях в физике Солнца, особенно в свете новых данных, получаемых с космических аппаратов типа TRACE, RHESSY, CORONAS-F, CORONAS-PHOTON, SOHO, SDO и др.

Подчеркивается, что, несмотря на огромное количество, высокое качество и новизну космической информации, главным итогом последних десятилетий развития солнечной физики является то, что **СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ** Солнца, сложившаяся к началу космической эры в астрономии к 70-м гг. прошлого века, в основных своих чертах сохранила силу и на современном этапе. Заметной корректировке подверглись лишь второстепенные детали общей картины (такие, например, как глубина конвективной зоны). Этот факт имеет фундаментальное значение для всей астрофизики, поскольку Солнце выступает как эталонная звезда, свойства которой изучены наиболее полно, как наиболее близкая к нам плазменная космическая лаборатория, в которой можно в деталях проверять самые разнообразные теоретические модели.

Безусловно важным достижением последних десятилетий является развитие гелиосейсмологии. Ее результаты впечатляют, они, в частности, позволяют установить законы дифференциального вращения в глубоких слоях Солнца, что крайне важно для механизма генерации магнитных полей. В лекции очень коротко излагаются основы солнечной магнитной гидродинамики. Основное внимание уделяется явлениям солнечной активности: солнечным пятнам, протуберанцам-волокам, хромосферным вспышкам, корональным выбросам массы, корональным дырам и горячим корональным «спайдерам» — качественно новым объектам, открытым с помощью российских космических обсерваторий CORONAS-F и CORONAS-PHOTON. Обсуждаются морфология и физические свойства этих активных образований, описываются их наиболее эффективные теоретические модели, такие, например, как модель «мелкого» солнеч-

ного пятна, модель петельного магнитного выброса, жгутовые модели солнечной вспышки, аркадная модель спокойного протуберанца, модель корональной дыры, модель спайдера и пр.

Особого обсуждения заслуживают данные, получаемые в течение последнего года с SOLAR DYNAMIC OBSERVATORY (SDO), запущенной NASA в феврале 2010 г. в рамках проекта Living with a Star. Основная цель миссии — глубже понять природу солнечной активности и тех сложных нестационарных процессов в атмосфере Солнца, которые приводят к вариабельности солнечной постоянной, резким изменениям скорости солнечного ветра, интенсивности заряженных и пр., в целом — к непостоянству космической погоды, непосредственно влияющей на земные процессы. SDO позволяет получать видеоизображения солнечных вспышек в линиях ультрафиолета с разрешением порядка одной секунды дуги, и это позволяет с беспрецедентной точностью проследживать развитие вспышечного процесса в нижней хромосфере и короне Солнца.

В лекции на основе данных SDO будут подробно проанализированы особенности развития двух солнечных вспышек, произошедших 7 июня и 29 сентября 2011 г.

## **АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ: СТРОЕНИЕ И ОПТИКА**

В лекции рассказывается о строении, тепловом режиме и особенностях химического состава различных слоев атмосферы Земли. Отмечается сильное влияние малых газовых составляющих на физические свойства атмосферы, хотя относительное содержание этих газов исчисляется долями процента. Рассматриваются слои твердых и жидких частиц на различных высотах в атмосфере, механизм их формирования и наблюдательные проявления, а также оптические явления, происходящие в атмосфере.

The lecture describes the structure, thermal regime and chemical properties of the different layers of the Earth's atmosphere. The strong influence of minor gaseous components on the physical state of atmosphere is noticed, despite of low relative concentration of these gases (parts of percent). The solid and liquid particles layers, their formation and observational effects are also described. The atmospheric optical events are listed.

## **Введение**

Эра астрономических исследований из космоса началась несколько десятилетий назад. Но и сейчас подавляющее большинство астрономических наблюдений проводится с поверхности нашей планеты Земли. Относится это не только к любительским телескопам, но и к исследованиям на передовом фронте астрономической науки. За последние десятилетия в строй было введено несколько наземных оптических телескопов с диаметром объектива от 5 до 10 м, еще больше проектов находятся в стадии разработки.

Во время любых наземных астрономических наблюдений, будь то обычная зрительная труба или телескоп им. Кека, мы регистрируем излучение далеких объектов, которое пришло к нам на поверхность Земли сквозь газовую оболочку нашей планеты — атмосферу. Сама же атмосфера Земли очень сложна и во многом уникальна по сравнению с другими планетами Солнечной системы. Уникальность заключается не только в обилии кислорода, дающего нам возможность дышать. Наша газовая оболочка имеет сложный химический

состав, высотное строение, физические и оптические свойства. Что особенно важно, все эти свойства оптимальны для поддержания жизни на нашей планете, по крайней мере если не подвергать атмосферу сильному физическому или химическому возмущению (как внешнему, так и внутреннему).

Естественно, атмосфера изменяет излучение далеких объектов, проходящее сквозь нее. Взаимодействие излучения с атмосферой включает в себя несколько разных процессов, и при проведении астрономических исследований ученые должны четко представлять, каким образом атмосфера влияет на вид небесных объектов и как правильно учесть это влияние.

Не менее важной задачей является выбор правильного места для строительства обсерваторий и проведения наблюдений. К этому пункту на Земле предъявляются серьезные требования: все атмосферные эффекты, влияющие на изображение небесных объектов, должны быть если не минимальными, то легко учитываемыми, предсказуемыми. Помимо этого в пункте наблюдений часто должна быть ясная погода. Ведь облака — достаточно распространенные и элементарные атмосферные образования — сильнейшим образом влияют на условия астрономических наблюдений, зачастую делая их просто невозможными.

Все вышеперечисленное тесно связывает астрономическую науку с физикой и оптикой атмосферы Земли. Поэтому многие астрономы, особенно экспериментаторы, занимающиеся наблюдениями, являются хорошими специалистами в атмосферной оптике. С другой стороны, астрономическая наука на протяжении многих десятилетий способствовала развитию науки об атмосфере, особенно о ее верхних слоях. И сейчас одним из главных инструментов изучения физики атмосферы являются космические проекты. А когда мы говорим о наземных астрономических наблюдениях, мы не можем не учитывать свойства атмосферы, поэтому они должны быть хорошо известны любому астроному-экспериментатору.

## **Строение и состав атмосферы**

Газовая оболочка нашей планеты достаточно обширна. Окутывая весь земной шар, она простирается от поверхности Земли до высот в несколько сотен километров. Большинство искусственных спутников Земли обращаются по своим орбитам в среде, существенно более

плотной, чем окружающее межпланетное пространство, что приводит к изменению орбит — постепенному снижению спутников и их последующему входу в плотные слои атмосферы.

Газовый состав атмосферы достаточно сложен и изменяется с высотой. 99.9 % всей массы атмосферы составляют молекулярный азот ( $N_2$ , около 78 %), молекулярный кислород ( $O_2$ , около 21 %) и аргон (Ar, чуть менее 1 %). И хотя все остальные примеси составляют лишь малые доли процента, влияние некоторых из них на физические условия на поверхности Земли оказывается очень сильным. Достаточно сказать, что если бы атмосфера состояла только из азота, кислорода и аргона, жизнь в ее современных формах на поверхности нашей планеты была бы невозможна: средняя температура была бы существенно ниже  $0^\circ C$ , а сама поверхность Земли подвергалась бы мощному потоку ультрафиолетовой радиации Солнца.

Столь необычная картина связана с тем, что все три основных газа атмосферы прозрачны как для видимых солнечных лучей, так и для теплового инфракрасного излучения Земли (молекулярный кислород имеет узкие полосы поглощения на границе видимого и инфракрасного диапазонов, но они не изменяют общей температурной картины). В реальной атмосфере вся переработка радиации и, таким образом, регулирование теплового баланса осуществляются другими газами — малыми газовыми примесями.

Состав малых газовых примесей и физические свойства атмосферы Земли на разных высотах сильно отличаются друг от друга. Почти 90 % всей массы атмосферы сосредоточено в ее нижнем слое — тропосфере. Это самая знакомая нам часть атмосферы, среда нашего обитания. В качестве примесей в ней присутствуют инертные газы (не только аргон), углекислый газ, водяной пар и другие соединения. Доля водяного пара обычно составляет сотые доли процента, тем не менее он играет ключевую роль во многих тропосферных процессах, в частности в формировании облачности и осадков. Именно содержание водяного пара является основным фактором, определяющим климат (и астроклимат).

Почему же малая атмосферная примесь, коей является водяной пар, оказывается столь важной в тропосфере? Все дело в том, что водяной пар по сути единственная газовая составляющая, способная конденсироваться (превращаться в жидкость) в тех условиях, что господствуют в тропосфере. Как известно, вода характеризуется большим значением удельной теплоты парообразования  $2.25 \times 10^6$  Дж/кг, и при конденсации водяного пара выделяется значи-



тельное количество энергии. После ряда преобразований именно эта энергия приходит к нам в виде ураганов, гроз и других атмосферных катаклизмов. Водяной пар играет определяющую роль в тепловом балансе тропосферы — как приземных, так и более высоких ее слоев. Теплота парообразования также играет роль резервуара энергии, существенно снижающего температурные вариации на влажных территориях поверхности Земли и в нижней атмосфере.

Помимо этого водяной пар вместе с рядом других малых газовых составляющих (тропосферным озоном  $O_3$  и прежде всего углекислым газом  $CO_2$ ) обладает широкими полосами поглощения в инфракрасной области спектра, уменьшая отток энергии от Земли и способствуя нагреву ее поверхности и нижних слоев атмосферы, в этом состоит суть парникового эффекта. Именно поэтому температура поверхности Земли существенно выше, чем в случае чистой азотно-кислородной атмосферы.

Температура тропосферного воздуха уменьшается с высотой в среднем на  $6^\circ C$  на километр, при этом сухой воздух охлаждается с высотой еще быстрее —  $10^\circ C$  на километр. Данная величина соответствует термодинамическим законам для газа в поле тяжести, лишённого собственных источников тепла (эта адиабатическая модель в целом справедлива для сухой прозрачной тропосферы). Вершины гор остаются заснеженными, даже когда у их подножия по-летнему тепло. А за бортом самолета, набравшего высоту около 10 км, обычное значение температуры составляет  $-50^\circ C$ .

Разница высотного температурного градиента для сухого и влажного воздуха может оказывать заметное влияние на климатические условия на поверхности. Примером тому может служить фен — ветер, огибающий горные массивы (рис. 1). До встречи с горами воздух может быть влажным, но при подъеме вдоль склона влага конденсируется, образует облака и выделяет тепло, замедляя охлаждение воздуха. После обхода горного массива воздух, теперь уже сухой, быстро нагревается и при достижении поверхности оказывается значительно теплее, чем до подъема. Погода на этой территории будет теплой и ясной.

Уменьшение температуры с высотой позволяет атмосферному воздуху перемешиваться: теплые массы поднимаются вверх, холодные — опускаются вниз. За счет этого конвективного перемешивания химический состав тропосферного воздуха почти не изменяется с высотой. Уменьшается лишь содержание водяного пара, — поднимаясь вверх, в более холодные области тропосферы, он конденсируется.

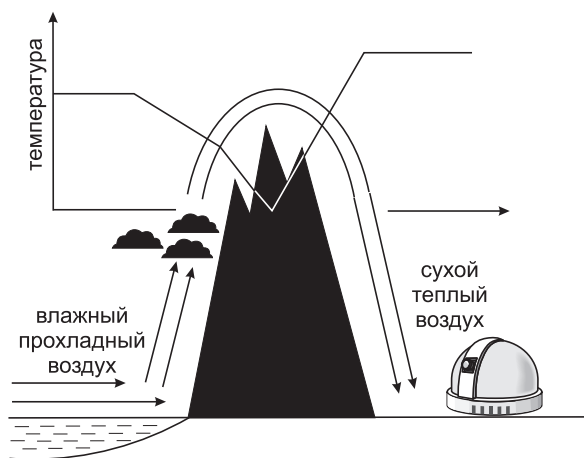


Рис. 1. Течение воздуха через горный массив

Так в атмосфере образуются облака, прежде всего в циклонах, областях пониженного приземного атмосферного давления. Воздушные массы перемещаются над поверхностью Земли от краев к центру циклона, а затем поднимаются вверх, образуя облачность. В антициклоне — области повышенного давления — ситуация обратная: сухие воздушные массы опускаются из верхних слоев тропосферы, и погода остается безоблачной.

Выше 10 км уменьшение температуры замедляется, а на высоте 15—17 км оно и вовсе останавливается. Тропосферные конвективные потоки не поднимаются выше этого слоя, который называется тропопаузой — верхней границей тропосферы. Далее начинается следующий слой нашей газовой оболочки — стратосфера. До высот порядка 30 км температура там не меняется с высотой и весьма мала: около  $-60^{\circ}\text{C}$ , а зимой в полярных широтах — и того меньше. Иногда она там падает ниже  $-80^{\circ}\text{C}$ , и тогда даже при низком стратосферном давлении возможно образование кристалликов льда. В этом случае мы наблюдаем перламутровые или полярные стратосферные облака на высотах 17—20 км. Они бывают видны в полярные сумерки, когда их подсвечивает зашедшее Солнце, и представляют собой очень красивое зрелище.

Основными химическими составляющими в стратосфере остаются молекулярный азот и кислород, но состав малых примесей суще-

ственно изменяется. Связано это прежде всего с тем, что до стратосферы доходит некоторое количество высокоэнергичного (рентгеновского) излучения Солнца. Под его действием небольшая часть молекул кислорода начинает диссоциировать — распадаться на атомы кислорода, активные химические реагенты. Они вступают в ряд реакций, образуя малые газовые стратосферные примеси. Одна из самых важных реакций — соединение атома кислорода с молекулой кислорода при каталитическом участии третьей молекулы. Результатом этой реакции является молекула озона  $O_3$ , важнейшего газа, необходимого для существования жизни на Земле. Именно озон задерживает губительное для нас ультрафиолетовое излучение Солнца, не пропуская его дальше в тропосферу и к поверхности Земли.

Общее содержание озона в атмосфере Земли не так уж и велико: если бы мы могли собрать его и перенести к поверхности Земли, то при нормальных условиях слой чистого озона имел бы толщину около 3 мм. В действительности озон распределен по всей стратосфере с максимумом концентрации на высоте около 25 км, являясь на всех высотах лишь малой примесью — порядка 0.001 % по объему. Но полосы поглощения ультрафиолетового излучения у молекулы озона столь сильны, что такого количества оказывается достаточно, чтобы самое опасное излучение с длиной волны меньше  $3000 \text{ \AA}$  не достигало поверхности нашей планеты. Более мягкий ультрафиолет ( $3000\text{--}3200 \text{ \AA}$ ) приходит к нам существенно ослабленным.

Естественно, любые изменения содержания озона в атмосфере могут резко изменить поток ультрафиолетового излучения Солнца у поверхности Земли. И «озоновая дыра», появившаяся над южным полушарием в последние десятилетия XX в., стала предметом серьезного беспокойства во всем мире. «Дыра» вполне могла иметь антропогенное происхождение: соединения азота и галогенов (хлора, брома), выбрасываемые в атмосферу, сохраняются в течение длительного времени, могут попасть в стратосферу, где будут уничтожать озон. Процесс этот весьма эффективный: один атом хлора в стратосфере может последовательно разрушить несколько миллионов молекул озона! Не последнюю роль в процессе уничтожения озона играют упомянутые выше полярные стратосферные облака, они имеют сложный химический состав, богатый соединениями хлора и азота, освобождаемыми в атмосферу под действием солнечного излучения. Поэтому холодные полярные стратосферные вихри, содержащие эти облака, часто совпадают с областями пониженного содержания озона.

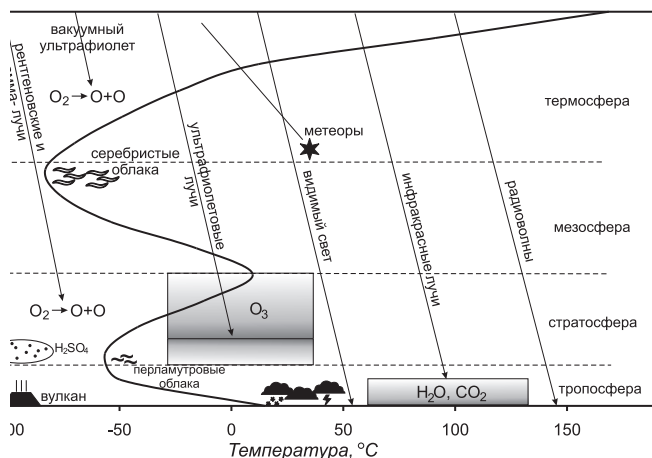


Рис. 2. Температура и прозрачность атмосферных слоев в различных диапазонах электромагнитного спектра

Задерживая значительную долю солнечного ультрафиолета, озон существенно влияет на тепловой баланс в стратосфере, так как поглощаемая им энергия в конце концов превращается в тепло. В результате, как уже было сказано выше, охлаждение атмосферы с высотой останавливается, а выше 30 км температура начинает расти, увеличиваясь до  $0^\circ\text{C}$  на высоте 50 км (рис. 2). Здесь мы можем видеть еще один замечательный пример того, как сильно может влиять на состояние атмосферы малая газовая примесь.

Выше 50 км озона становится мало и атмосфера (как и в нижних слоях) оказывается прозрачной для ультрафиолетового излучения с длиной волны более  $2400 \text{ \AA}$ . Еще более энергичное УФ-излучение («вакуумный ультрафиолет») до указанных высот не доходит, так как поглощается выше молекулярным кислородом. Источник дополнительного нагрева газовой среды исчезает, и температура вновь начинает уменьшаться с высотой. Мы попали в следующий слой земной атмосферы, называемый мезосферой. Она простирается до высот порядка 90 км, и ее верхняя часть оказывается самым холодным слоем всей атмосферы: температура там может опускаться ниже  $-90^\circ\text{C}$ .

Самое интересное заключается в том, что наиболее холодной мезосфера оказывается в умеренных и полярных широтах в летние месяцы (май—июль в северном полушарии), несмотря на то, что в это

время она освещена Солнцем круглые сутки. Разгадка столь странного поведения температуры верхней мезосферы заключается опять же в том, что она прозрачна для солнечного излучения, доходящего до этих высот, и практически не задерживает его. В данных условиях на первый план выходят другие факторы, определяющие тепловой баланс мезосферы, прежде всего перенос воздушных масс. Летом в умеренных широтах воздух поступает в верхнюю мезосферу из более низких слоев, при этом расширяясь и сильно выхолаживаясь.

Короткими летними ночами в средних широтах над светлым северным горизонтом иногда можно наблюдать белые кружева серебристых облаков, самых высоких в земной атмосфере. Они образуются в холодных летних мезосферных условиях на высотах 80—85 км. Солнце подсвечивает эти слои атмосферы даже в полночь, и серебристые облака представляют собой очень красивое явление. Вопрос о природе и составе столь высоких облаков долгое время оставался открытым и считался пограничным между геофизикой и астрономией. Даже сейчас эта область атмосферы остается несколько более трудной для исследований, ведь для самолетов и шар-зондов это слишком высоко, а для космических аппаратов — слишком низко.

Серебристые облака, состоящие из мельчайших кристалликов льда, более других объектов атмосферы заслуживают название «видимая пустота». Их плотность очень мала, и сквозь них легко можно наблюдать звезды. Но из-за хорошей подсветки Солнцем они хорошо видны и часто выделяются на фоне летней ночной зари. Интересно, что серебристые облака не наблюдались на Земле до конца XIX в., впервые появившись только в 1885 г. Причиной их появления именно в это время вполне могло стать мощное извержение вулкана Кракатау за два года до этого и обильный выброс пыли вплоть до мезосферы (об этом извержении речь пойдет далее). Однако в вековом масштабе появление серебристых облаков связано с существенным похолоданием мезосферы, происходящим в течение всего периода ее изучения — немногим более 100 лет.

Выше 90 км начинается следующий слой атмосферы — термосфера. Он отличается от более низких слоев своим химическим составом. Энергичное ультрафиолетовое излучение Солнца доходит до этих слоев в достаточном количестве для того, чтобы на отдельные атомы разделилась заметная часть молекул кислорода, тем большая, чем выше мы находимся. Одновременно с процессом диссоциации идет другой процесс — ионизация, при котором от молекулы кислорода отрывается один электрон, а сама молекула превращает-

ся в ион  $O_2^+$ . Ионизации подвергаются и молекулы азота  $N_2$ , а вот их диссоциация идет слабо, так как она требует очень большой энергии кванта света. Значительная часть атмосферного азота переходит в атомарное состояние только на высотах 200 км и более.

Процессы ионизации и диссоциации молекул идут с поглощением энергии солнечного излучения. Только здесь, в термосфере, излучение перерабатывается в тепло не малой газовой примесью, а основными атмосферными составляющими. Температура среды быстро увеличивается с высотой, что и дало термосфере ее название. На высоте 300 км температура достигает уже  $+700^\circ C$ , однако здесь нужно оговориться, что верхние разреженные слои атмосферы не находятся в состоянии термодинамического равновесия, и речь идет о кинетической температуре, определяемой скоростями атомов и молекул. Если в термосферу можно было бы поместить обычный термометр, он бы показал значительно меньшие значения температуры, так как излучал бы в пространство энергию быстрее, чем получал ее от горячей, но разреженной среды.

Наличие в верхних слоях атмосферы заряженных частиц — ионов и электронов — сказывается на ее физических свойствах, в частности на распространении радиоволн в этой среде. Часть атмосферы выше 80 км (верхняя мезосфера и термосфера) также называют ионосферой, которая, в свою очередь, разделяется на отдельные слои, характеризующиеся своими значениями ионной и электронной плотности, химическим составом ионов.

Наконец, самым верхним слоем земной атмосферы является экзосфера. Она начинается на высоте 400—500 км и не имеет четкой верхней границы. Собственно, экзосфера — это уже не совсем атмосфера Земли, а область ее перехода в межпланетное пространство. Азот и кислород, уже в атомарном и частично ионизованном виде, уступают место ионизованному атомарному водороду и гелию. Эти частицы не являются «постоянной принадлежностью» атмосферы. Имея большие значения скорости, они могут покинуть окрестности Земли, вместо них в экзосферу поступают новые атомы водорода и гелия. Источником атомов водорода являются его соединения в нижней атмосфере, прежде всего метан  $CH_4$ . Под действием солнечного ультрафиолета его молекулы распадаются, освобождая атомы водорода. Будучи легкими и быстрыми частицами, атомы водорода поднимаются в верхние слои атмосферы. Похожим образом ведут себя и атомы гелия, образующиеся в результате распада радиоактивных элементов в земной коре и в атмосфере (газ радон). Ядра водорода

и гелия также входят в состав солнечного ветра, постоянно вторгающегося в верхнюю атмосферу Земли. Естественно, состояние экзосферы, как и межпланетной среды, зависит от внешних факторов, в первую очередь от солнечной активности.

## Твердые и жидкие частицы в атмосфере

Газовая оболочка нашей планеты состоит, вообще говоря, не только из газа. В плотной газовой среде могут быть взвешены твердые и жидкие частицы. Они оказывают существенное влияние как на физические характеристики атмосферы, так и на ее оптическое состояние, важное с точки зрения проведения астрономических наблюдений. С самым ярким проявлением этого эффекта — облаками — мы знакомы с детства. Выше уже говорилось об отдельных типах облаков, в частности, перламутровых и серебристых, которые возникают в областях температурного минимума в достаточно высоких слоях атмосферы. Большинство облаков возникают на меньших высотах, в тропосфере. Ниже всего образуются кучевые и слоистые облака. Кучевые облака могут развиваться в кучево-дождевые и грозовые облака. Они занимают более широкий диапазон высот. За счет конвективного переноса они могут подойти к тропопаузе. Далее они растягиваются в горизонтальном направлении, образуя характерный вид «наковальни». В верхней части тропосферы располагаются перистые облака, также называемые циррусами.

Атмосфера содержит взвешенные частицы (атмосферные аэрозоли) и при ясной погоде. Они различаются по своим свойствам, составу и высотам. В приземных слоях и нижней тропосфере можно наблюдать большое количество пылевого аэрозоля. Особенно сильно он проявляет себя в пустынных территориях. Частицы, поднимаемые с поверхности Земли, далее переносятся ветром на значительные расстояния. Аэрозоль присутствует в тропосфере практически постоянно. Одним из его наблюдательных проявлений служит уменьшение поляризации фона неба в зените при восходе Солнца над горизонтом, когда его лучи начинают хорошо освещать тропосферу (рис. 3). Фон неба представлен рассеянным излучением Солнца, а поляризация аэрозольного рассеяния существенно меньше поляризации молекулярного (релеевского) рассеяния, что и вызывает наблюдаемый эффект.

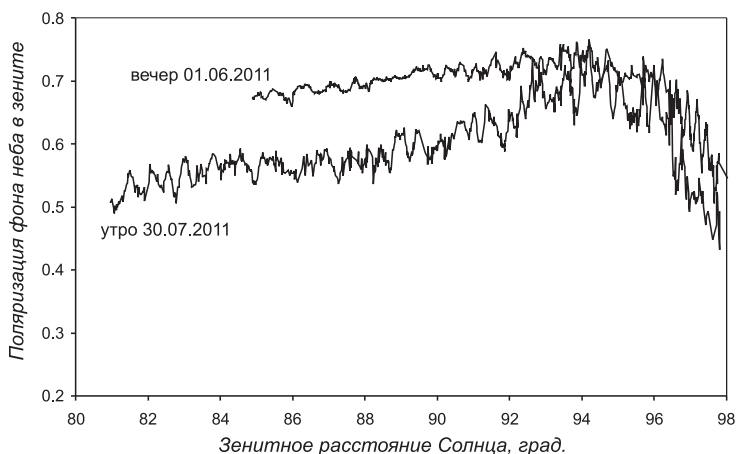


Рис. 3. Поляризация фона сумеречного неба в зените в зависимости от зенитного расстояния Солнца вечером 1 июня (чистая тропосфера) и утром 30 июля (замутненная тропосфера) 2011 г., Подмосковье, длина волны 5400 Å

У поверхности Земли могут образовываться капельки воды летом или кристаллики льда зимой. В этом случае мы сталкиваемся с явлением летнего или зимнего тумана. Тот же самый туман, но на некоторой высоте над поверхностью Земли, образует неплотные слоистые облака. Сквозь них могут быть видны Солнце и Луна, лунной ночью можно наблюдать красивые оптические явления, которые будут описаны далее.

Атмосферный аэрозоль может иметь антропогенное происхождение, и с этим мы, к сожалению, сталкиваемся все чаще, особенно вблизи крупных городов. Промышленные выбросы содержат сажу, капельки растворов разнообразных веществ, которые надолго задерживаются в тропосфере.

Одним из главных источников атмосферного аэрозоля в широком диапазоне высот являются извержения вулканов. Наиболее мощные из этих явлений приводят к глобальному увеличению содержания аэрозоля на период в несколько лет. Последний раз это наблюдалось в 90-е гг. XX в. после извержения вулкана Пинатубо в июне 1991 г. Вулканическое загрязнение атмосферы идет двумя путями. В тро-



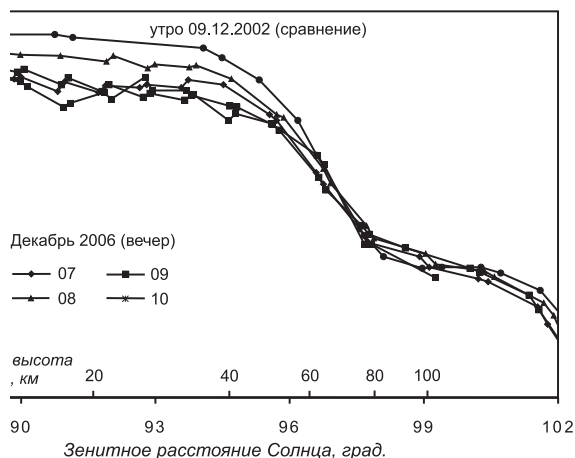


Рис. 4. Поляризация фона сумеречного неба в зените в зависимости от зенитного расстояния Солнца и эффективной высоты рассеяния в декабре 2002 и 2006 гг., Крым, длина волны 5 250 Å

посферу выбрасывается большое количество пыли и пепла, которое достигает высот в несколько километров и далее разносится ветрами над обширными территориями.

Второй сценарий загрязнения атмосферы связан с газовыми продуктами вулканических извержений, прежде всего с диоксидом серы  $\text{SO}_2$ . В тропосферных условиях этот газ химически стабилен. Однако во время сильных извержений он может пройти сквозь тропопазу и оказаться в стратосфере, содержащей активные химические компоненты — атомарный кислород, озон, гидроксил  $\text{OH}$ . В ходе химических реакций они окисляют диоксид серы, превращая его в серную кислоту  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Это вещество может конденсироваться в стратосферных условиях, образуя частицы сульфатного аэрозоля, аналогично атмосфере Венеры, хотя и с меньшей плотностью. Подобный сценарий — основной механизм появления аэрозоля в обычно чистой (за исключением полярных областей) стратосфере. Быстрые стратосферные ветры разносят диоксид серы и сульфатный аэрозоль над значительной частью поверхности Земли.

Появление стратосферного аэрозоля также может быть зарегистрировано на основе поляризационных измерений фона сумеречного неба вблизи зенита. Теперь оно будет наблюдаться после захода

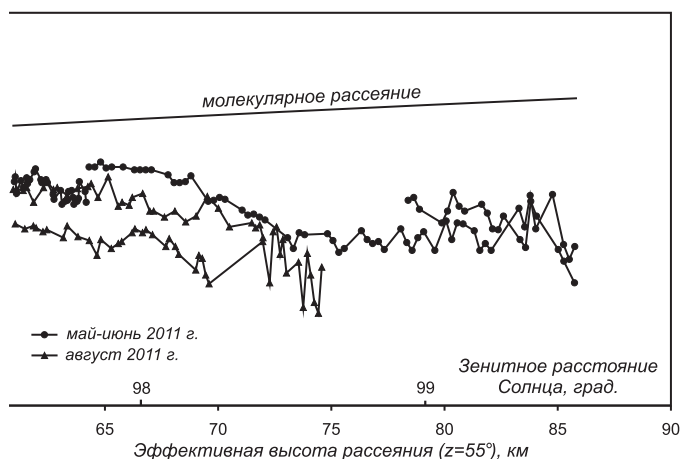


Рис. 5. Поляризация однократно рассеянной компоненты фона сумеречного неба в солнечном вертикале (зенитное расстояние  $55^\circ$ ) в зависимости от эффективной высоты рассеяния летом 2011 г., Подмосковье, длина волны  $5400 \text{ \AA}$

Солнца при его погружении под горизонт на  $1\text{--}4^\circ$ . В это время тропосфера освещена солнечными лучами слабо (в том числе за счет их сильного ослабления в плотных слоях) и основная доля фона неба формируется в стратосфере. Аэрозоль в этом слое также вызывает уменьшение поляризации фона неба, как это видно на примере измерений в декабре 2006 г., через 2 месяца после извержения вулкана Рабаул в Новой Гвинее (рис. 4).

Однако стратосфера еще не предел по высоте для появления частиц аэрозоля. Мы уже говорили о серебристых облаках, появляющихся на высотах порядка  $80\text{--}90 \text{ км}$ . На этих же высотах происходит торможение метеорных тел, вторгающихся из межпланетного пространства. Мелкие частицы размером порядка  $1 \text{ мкм}$  заполняют плоскость Солнечной системы, рассеивая излучение Солнца и образуя зодиакальный свет. При встрече с Землей они задерживаются в мезосфере, не разрушаясь. Наличие пылевого слоя на высотах более  $70 \text{ км}$  вновь может быть обнаружено на основе поляризационных наблюдений фона сумеречного неба (рис. 5), только в данном случае необходимы измерения в разных точках солнечного вертикала и корректная процедура учета многократного рассеяния света в нижних слоях атмосферы.

В атмосферу Земли попадают и более крупные тела. Сгорая там, они образуют явление метеоров. Если в состав метеорного тела входят тяжелые и тугоплавкие вещества (прежде всего соединения металлов), то при его разрушении они могут образовать вторичную метеорную пыль на основе окисей этих металлов. Приток метеорного вещества в мезосферу усиливается после максимумов больших метеорных потоков. За время порядка нескольких дней или недель частицы постепенно опускаются в стратосферу.

Есть указания на связь серебристых облаков с мезосферной пылью, в том числе космического происхождения. Механизм этой связи понятен: частицы метеорной пыли могут играть роль ядер конденсации для образования серебристых облаков в разреженных метеорных условиях. В пользу этого механизма говорит и явление аномально светлых ночей, наблюдавшееся в России и Европе после падения Тунгусского метеорита утром 30 июня 1908 г. Если Тунгусский метеорит был небольшой кометой, а подтверждений этому немало, то вместе с ним в атмосферу должно было вторгнуться множество микрочастиц, составлявших хвост этой кометы и резко изменивших оптические характеристики мезосферы на последующие дни. Заметим, что светлые ночи наблюдались в Европе, располагавшейся в задней полусфере Земли по отношению к метеориту в момент его падения. Это указывает на сравнительно большие размеры пылевого хвоста и длительный процесс выпадения пыли в мезосферу.

Ко всему сказанному необходимо добавить, что наблюдения метеоров были основой изучения верхних слоев атмосферы в течение большей части XX в., до начала космической эпохи. Физические параметры этих слоев восстанавливались на основе измерений скорости, интенсивности возгорания метеорных тел. Часто это удавалось сделать с хорошими результатами: к началу эпохи освоения космоса распределение температуры и плотности в верхних слоях атмосферы уже было известно. Это хороший пример того, что не только атмосферная наука важна для развития астрономии, но и, наоборот, астрономические методы оказываются эффективными для решения задач физики атмосферы.

## **Оптические явления в атмосфере**

Как мы убедились, атмосфера нашей планеты — сложная многокомпонентная система. Естественно, оптические эффекты, создаваемые атмосферой, тоже сложны и многообразны. Столь же сложным

будет влияние атмосферы на изображения небесных объектов, которые мы рассматриваем сквозь нашу газовую оболочку. В этом влиянии можно выделить две основные составляющие, оговорившись, что одно редко наблюдается без другого. Это изменение направления распространения излучения и изменение его интенсивности. Мы не говорим отдельно об изменении спектра излучения, так как оно есть следствие зависимости первых двух процессов от длины волны.

Направление излучения, проходящего через атмосферу, изменяется, поскольку сама атмосфера состоит из слоев с разной плотностью и коэффициентом преломления, т. е. напоминает сложную линзу. Если свет звезды попадает в атмосферу под некоторым углом к вертикали, то по ходу движения к поверхности Земли угол будет уменьшаться. В результате наблюдатель увидит эту звезду над горизонтом несколько выше ее истинного положения. Явление получило название атмосферной рефракции (от англ. *refraction* — преломление). На большой высоте над горизонтом величина рефракции пропорциональна тангенсу зенитного расстояния, а коэффициент пропорциональности близок к одной угловой минуте. Так, для звезды, расположенной в  $60^\circ$  над горизонтом, величина рефракции составит  $34''$ .

При приближении к горизонту картина становится сложнее, на нее начинает влиять сферичность Земли и окутывающей ее атмосферы. Сама же величина рефракции достаточно быстро возрастает, достигая у горизонта  $35'$  (это значение зависит от температуры и атмосферного давления). Это чуть больше видимых размеров Солнца и Луны. То есть наблюдатель видит весь диск Солнца в тот момент, когда он еще не должен был показаться из-за горизонта.

В это же время на восходе или заходе Солнца могут быть заметны более тонкие эффекты, связанные с атмосферной рефракцией. В частности, можно заметить, что величина рефракции сильно зависит от высоты над горизонтом, верхний край солнечного диска приподнимается несколько слабее, чем нижний, и диск кажется сплюснутым. Значительно труднее заметить эффект, порожденный зависимостью величины рефракции от длины волны: коротковолновое (синее) излучение преломляется чуть-чуть сильнее длинноволнового. Благодаря этому при хорошей погоде и открытом горизонте (например, над морем) иногда можно увидеть, что последний луч красного заходящего Солнца окрашен в зеленые тона, что и дало явлению название «зеленый луч».

Казалось бы, луч должен быть не зеленым, а синим, так как синие лучи подвержены рефракции еще сильнее. Но здесь нужно принять в расчет еще один атмосферный эффект, который влияет уже на интенсивность проходящего излучения. Это эффект ослабления (поглощения) света. Оно может происходить вследствие рассеяния и истинного поглощения. Основная рассеивающая среда в атмосфере — газовая (молекулярная). Свойства молекулярного рассеяния таковы, что оно усиливается обратно пропорционально четвертой степени длины волны, т. е. синие лучи рассеиваются значительно сильнее красных. Это и дает ясному дневному небу насыщенный голубой цвет. Но по этой же причине синие лучи не могут напрямую пройти через большую толщу атмосферы, и Солнце (как и Луна, и другие светила) по мере приближения к горизонту окрашивается в красный цвет. А на заходе Солнца мы не можем наблюдать «синий луч» по причине полного блокирования коротковолнового излучения атмосферой.

Молекулярное рассеяние — далеко не единственный процесс ослабления света в земной атмосфере. Если бы наша газовая оболочка состояла из чистого воздуха, ослабление в зените в желтой области спектра составляло бы всего  $0.1^m$ . В реальности оно редко бывает меньше  $0.2^m$ , а чаще, даже при стабильной ясной погоде, еще больше. Причина состоит в атмосферном аэрозоле, речь о котором шла выше. Свойства аэрозольного рассеяния отличаются от рассеяния молекулярного и в существенной степени зависят от самих аэрозольных частиц. Аэрозольное рассеяние не обладает сильным цветовым избытком — синие лучи рассеиваются сильнее красных, но разница не столь велика. Поэтому не очень чистое небо (с дымкой, легкими облаками) теряет свой голубой оттенок, а ясное небо в пустынях из-за пыли практически всегда имеет беловатый цвет.

Еще одна отличительная особенность аэрозольного рассеяния — распределение интенсивности рассеянного света. Если воздушная среда рассеивает излучение почти одинаково во все стороны, то аэрозольные частицы имеют большой избыток рассеяния «вперед», под малым углом к направлению падающего излучения. Это приводит к появлению ярких беловато-желтых ореолов вокруг Солнца и Луны. Отражение света от поверхностей капель и кристаллов приводит к избыточному рассеянию под определенными углами, что является основой таких явлений во влажной атмосфере, как радуга (там угол максимального рассеяния зависит от длины волны), круги вокруг Луны и световые «кольца».

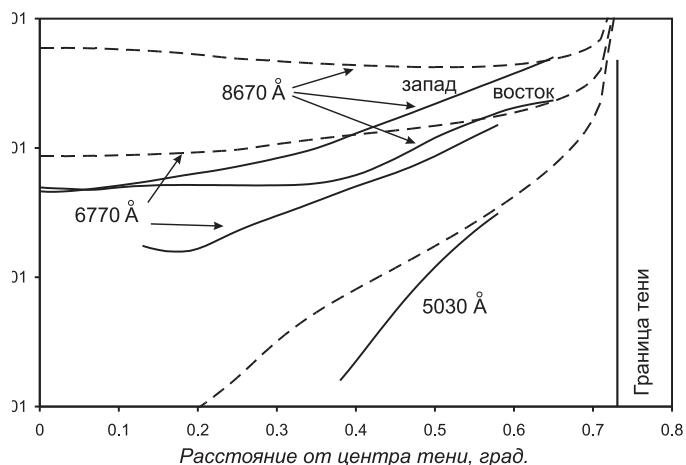


Рис. 6. Яркость поверхности Луны в тени Земли в зависимости от углового расстояния от центра тени во время затмения 15 июня 2011 г. для трех длин волн. Сплошные линии — наблюдения, пунктирные линии — газовая модель атмосферы

Главная трудность для астрономических наблюдений, связанная с аэрозольным рассеянием, — его непрерывная изменчивость в пространстве и времени, неопределенность в его свойствах. Все это создает трудности при вычислении атмосферного ослабления в разных длинах волн, необходимого для фотометрии небесных светил — измерения интенсивности их излучения.

Комбинация атмосферной рефракции и ослабления объясняет устрашающий темно-красный цвет Луны во время полных лунных затмений. Благодаря явлению рефракции солнечные лучи как бы огибают Землю и попадают в область ее геометрической тени, освещая Луну и не давая ей «исчезнуть» с нашего неба. В то же время эти лучи, проходя большой путь сквозь атмосферу, существенно ослабляются, особенно в сине-зеленой области спектра. Яркость Луны в тени Земли, особенно в ее центральной области, резко уменьшается в коротковолновой области спектра, что можно видеть на рис. 6, основанном на измерениях во время полного лунного затмения 15 июня 2011 г. Луна приобретает красный цвет, аналогичный заходящему Солнцу и красной вечерней заре на Земле. И хотя данные явления

имеют сходную природу, подчас непредсказуемое сознание людей совершенно по-разному их воспринимает: красный закат Солнца и зари были неотъемлемой частью многих романтических сюжетов, а вот затмившаяся Луна ассоциировалась с кровью, бедствиями и войнами.

Аэрозольное ослабление также существенно сказывалось на лунных затмениях, делая их вид разным и подчас непредсказуемым. Бывало, происходили затмения, при которых Луна столь ярко светила в небе, что случайные очевидцы отказывались признать сам факт затмения. Напротив, иногда Луна во время затмений становилась практически невидимой. Свидетелями такого темного затмения стали жители Европы 4 октября 1884 г. Среди них был и французский астроном Камиль Фламарион, который указал на связь «темноты» затмения с ужасающим по своей мощи извержением вулкана Кракатау в Индонезии годом раньше, в августе 1883 г. Еще через год, в 1885 г., на Земле впервые наблюдались серебристые облака. Так была наглядно показана основная роль вулканических извержений в глобальном аэрозольном загрязнении атмосферы на несколько последующих лет. Темные лунные затмения наблюдались и после крупных извержений вулканов в XX в.

Однако не все излучение, задерживаемое атмосферной средой, рассеивается в ней. Идет также процесс истинного поглощения, при котором энергия кванта света переходит в другие формы, в том числе и в тепло, — с этим эффектом мы уже сталкивались, когда рассматривали механизмы нагрева стратосферы и термосферы. В основе эффектов лежал процесс поглощения солнечного ультрафиолета атмосферным озоном и кислородом соответственно. Каждый из атмосферных газов характеризуется своим набором спектральных интервалов, где он сильнее или слабее поглощает свет. Видимая область электромагнитного спектра — одна из немногих более или менее свободных от сильных полос поглощения атмосферных газов (слабые полосы там, конечно, есть). Благодаря этому наши глаза видят Солнце и другие небесные светила, и мы можем проводить астрономические наблюдения, хотя и сталкиваемся с проблемами вроде атмосферного аэрозоля.

Ультрафиолетовый диапазон спектра с длинами волн меньше 3000 Å надежно перекрыт полосами поглощения озона, кислорода и азота. Процессы ионизации и диссоциации молекул задерживают и более коротковолновое рентгеновское и гамма-излучение небесных объектов, которое доходит лишь до стратосферы. Полосы поглоще-

ния в изобилии присутствуют и с другой стороны от видимого диапазона. Уже на его границе с инфракрасным диапазоном есть области поглощения кислорода  $O_2$ , далее начинаются мощные полосы поглощения водяного пара  $H_2O$ . На еще больших длинах волн наблюдаются полосы поглощения озона  $O_3$  и углекислого газа  $CO_2$ , создающие «парниковый эффект», о котором говорилось ранее.

Атмосферный озон вообще является примером того, как один и тот же газ в разных слоях атмосферы играет противоположные роли для человека. Стратосферный озон — необходимый для нашей жизни надежный щит от солнечного ультрафиолета. А вот в тропосфере, где озона в последнее время стало больше из-за деятельности человека, это парниковый и к тому же ядовитый газ, вредный для нашего здоровья.

Лишь на длине волны около 1 мм атмосфера вновь становится прозрачной для излучения. Далее мы переходим в радиодиапазон. Для большей его части помехи, вносимые атмосферой, минимальные среди всего электромагнитного спектра. Поэтому радиоастрономия стала второй частью наземной наблюдательной астрономии, наряду с оптической. Быстрое развитие радиоастрономии с середины XX в. привело к прорыву во всей науке о Вселенной. Радиоокно прозрачности атмосферы достаточно обширно, и только волны с длиной более 10 м не доходят до поверхности нашей планеты — они отражаются ионосферой Земли.

Мы видим, что атмосфера скрывает от нас вид Вселенной в большей части электромагнитного спектра, сильно ограничивая объем информации, которую могут получить астрономы. Неудивительно, что выход в космическое пространство, сделавший астрономию всеволновой, ознаменовал начало новой эры в ее истории. Новая эра началась и в самой науке об атмосфере, так как значительная доля ее исследований сейчас также проводится из космоса. Хочется надеяться, что развитие атмосферной науки и расширение возможностей наблюдений поможет сохранить эту уникальную систему, все многообразие которой позволяет живым организмам существовать на Земле.

Автор работы выражает благодарность И. А. Маслову и С. А. Короткому, совместно с которыми проводились поляризационные измерения фона сумеречного неба и фотометрия лунных затмений.



Ю. В. Хачай<sup>1</sup>, В. Н. Анфилов<sup>2</sup>, А. Н. Антипин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геофизики УрО РАН

<sup>2</sup>Институт минералогии УрО РАН

## **О ВОЗМОЖНОМ ВЛИЯНИИ ПЕРВИЧНОЙ АТМОСФЕРЫ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗЕМЛЕ ПРИ ЕЕ АККУМУЛЯЦИИ**

### **Введение**

Наблюдаемое в настоящее время падение на земную поверхность тел от размеров пылинок до метеоритов, метеоров и более крупных тел являются остаточным проявлением мощного процесса аккумуляции планеты из протопланетного облака, наиболее активная фаза которого завершилась около 4.6 млрд лет назад. Внеатмосферные астрономические наблюдения позволили за последние годы выявить как планеты, так и протопланетные объекты на различных стадиях их эволюции у более 300 звезд. Тем самым нашли наблюдательное подтверждение основные идеи механизма аккумуляции планет, разрабатываемые в [1–4].

Геологическая эволюция Земли существенно зависит от ее начального состояния. Под начальным для Земли понимают ее состояние к завершению активного этапа аккумуляции. Несмотря на существенные достижения, до последнего времени не удавалось получить удовлетворительного объяснения ряду хорошо обоснованных фактов. В современной Земле основными структурами являются преимущественно силикатная мантия и практически железное по составу ядро. Результаты, полученные на основе анализа W—Hf изотопной системы, интерпретируются как свидетельство очень раннего, за время менее 10 млн лет, разделения химических резервуаров ядра и мантии [5]. Тогда как на основе результатов по уран-свинцовой системе формирование этих структур продолжалось около 100 млн лет, т. е. разделение их химических резервуаров произошло задолго до окончания роста самих структур.

Остаются дискуссионными вопросы формирования первичной атмосферы и ее влияния на распределение начальной температуры во внутренних областях Земли [6, 7].

В работе [8] нами была предложена новая модель аккумуляции планет земной группы, которая использует современные результаты изотопных геохимических анализов, позволивших получить надежные оценки концентрации короткоживущих естественно-радиоактивных изотопов, и прежде всего  $^{26}\text{Al}$ , в веществе протопланетного облака. На основе этих данных получены новые оценки распределения температуры в растущих зародышах планеты в зоне «питания» Земли. К очень близким результатам независимо пришли и авторы работы [9].

Для дальнейшей температурной эволюции Земли, как показало проведенное численное моделирование, определяющую роль играет распределение температуры в формирующемся ядре Земли. Дополнительный вклад обеспечивает наличие плотной, малопрозрачной атмосферы. Именно этим проблемам здесь будет уделено основное внимание.

Результаты, полученные нами в работе [8], показали, что уже на раннем этапе процесса аккумуляции выделения тепла короткоживущими естественно-радиоактивными элементами, и прежде всего  $^{26}\text{Al}$ , оказывается достаточно для того, чтобы в протопланетном зародыше, превышающем размеры (50—100) км, могла сформироваться расплавленная центральная область и сравнительно тонкая, твердая, преимущественно силикатная по составу верхняя оболочка. Скорости соударения тел на этом этапе еще малы, поэтому при соударении тел таких и близких размеров жидкие, преимущественно железные по составу части сливаются, но массы зародыша еще недостаточно для гравитационного удержания силикатных обломков холодной твердой оболочки. На этом этапе они сохраняются в зоне питания протопланеты. Реализуется механизм дифференциации вещества в процессе аккумуляции планеты на резервуар будущего ядра и резервуар мантии. Важно, что процесс идет еще в малых телах и успевает завершиться за время менее 10 млн лет, тогда как последующее формирование структуры ядра и мантии продолжается, как и по всем имеющимся оценкам, около 100 млн лет. Поскольку объединение жидких внутренних частей соударяющихся тел происходили в результате неупругого соударения, большая часть потенциальной гравитационной энергии через кинетическую энергию соударения преобразуется в тепло. Это продолжается до тех пор, пока ядро не достигнет большей части современной массы. На завершающей стадии роста ядра масса зародыша оказывается уже достаточной для того, чтобы удерживать все возрастающую долю силикат-

ной оболочки выпадающих тел. И состав растущей области все более обогащается примесью силикатов. Процесс соударения аккумуляруемых тел от механизма полностью неупругого слияния с высокой степенью сохранения потенциальной энергии гравитационного взаимодействия и преобразования ее в тепловую, постепенно переходит в механизм твердотельного соударения, при котором только небольшая часть кинетической энергии преобразуется в поглощаемое зародышем планеты тепло.

При математическом моделировании излагаемого механизма следует учитывать, что в рассматриваемой модели процесс дифференциации вещества ядра в большей своей части проходит на стадии его роста. К завершению формирования этой структуры концентрация короткоживущих радиоактивных изотопов становится настолько малой, что вклад энергии их распада становится невелик. Вопрос о вхождении долгоживущих радиоактивных изотопов в состав ядра остается открытым, но в большинстве рассматриваемых моделей их доля предполагается малой.

Проведенное математическое моделирование термической эволюции растущей планеты опирается на изложенную выше схему процесса. Для скорости роста зародыша планеты используется модель Сафронова в варианте [1]:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = 2(1 + 2\theta)r^2\omega\left(1 - \frac{m}{M}\right)\sigma, \quad (1)$$

где  $\omega$  — угловая скорость орбитального движения;  $\sigma$  — поверхностная плотность вещества в зоне «питания» планеты;  $M$  — современная масса планеты;  $r$  — радиус растущего зародыша;  $\theta$  — статистический параметр, учитывающий распределение частиц по массам и скоростям в зоне «питания».

Математическое описание массоэнергопереноса в растущем самогравитирующем теле переменного радиуса даже в модели однокомпонентной жидкости состоит в постановке краевых задач для системы уравнений баланса импульса, энергии и сохранения массы вещества и задачи Стефана на границах областей с включениями

зон расплава [10]:

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} \right] = -\nabla P + \eta \Delta \vec{V} + \left( \frac{\eta}{3} + \xi \right) \nabla (\nabla \vec{V}) - \rho \nabla W; \quad (2)$$

$$\rho T \left[ \frac{\partial S}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) S \right] = \lambda \Delta T + Q; \quad (3)$$

$$\Delta W_1 = -4\pi\gamma\rho, \quad W = W_1 + W_2; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho \vec{V}) = 0; \quad (5)$$

$$L \frac{\partial \vec{\psi}}{\partial t} = \vec{q}|_{\xi+0} - \vec{q}|_{\xi-0}, \quad (6)$$

где  $\vec{V}$  — скорость жидкости;  $P$  — давление;  $S$  — энтропия;  $W_1$  — гравитационный потенциал;  $W_2$  — центробежный потенциал  $\rho$  — плотность;  $\eta$  и  $\xi$  — коэффициенты первой и второй вязкости;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $\gamma$  — гравитационная постоянная;  $Q$  — суммарная мощность внутренних источников энергии в единице объема;  $L$  — теплота фазового перехода;  $\vec{\psi}$  — положение границы раздела фаз;  $\vec{q}|_{\xi+0}$  и  $\vec{q}|_{\xi-0}$  — плотность теплового потока соответственно перед и за фазовой границей;  $\nabla$  и  $\Delta$  — операторы «набла» и Лапласа.

Трудности доставляет уже решение краевых задач для первого уравнения (2) этой системы, которое называют уравнением Навье—Стокса. Даже в приближении с постоянными коэффициентами вязкости, как это использовано в (3), в 3D-сферическом слое нахождение численного решения представляет существенную проблему. Кроме того, в рамках уравнения (2) затруднительно описать вынужденное конвективное перемешивание вещества вблизи поверхности растущего тела при падении отдельных тел. Реальные вычислительные возможности позволяют использовать только сильно усредненное описание в сферически симметричной модели. При этом распределение температуры в теле увеличивающегося радиуса находится из численного решения краевой задачи для уравнения теплопроводности с учетом возможности появления расплава без явного выделения положения границы фронта кристаллизации и параметрического учета конвективного теплопереноса в расплаве по [11]:

$$c_{ef} \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda_{ef} \nabla T) + Q, \quad (7)$$

где  $c_{ef}$ ,  $\lambda_{ef}$  — эффективные значения теплоемкости и теплопроводности, которые учитывают теплоту плавления в задаче Стефана

по [11] и наличие конвективного теплопереноса;  $T$  — искомая температура в точке в момент времени  $t$ ;  $Q$  — объемная мощность внутренних источников тепла. В уравнениях (1), (7), (8) шаг по временной и пространственной сеткам используется один и тот же. Размерный шаг по пространственной сетке постоянный и составляет 100 м. Шаг по временной сетке переменный и при выбранном распределении плотности как функции глубины вычисляется из уравнения (1). С использованием этого уравнения на каждом временном шаге вычисляются масса растущей планеты и распределение литостатического давления во внутренних областях. Для каждого значения достигнутого размера растущей планеты вычисляется распределение температуры плавления. В ядре зависимость температуры плавления в основном железного состава вычисляется по [12]. В области формирующейся преимущественно силикатной мантии используется зависимость температуры плавления от давления по [3]. Зона полного и частичного плавления определялась для каждого временного слоя по сопоставлению вычисленного распределения температуры с распределением температуры плавления.

На поверхности растущего тела заданы условия, обеспечивающие баланс поступающей части потенциальной энергии гравитационного взаимодействия тел, затраты тепла на нагревание поступившего вещества и переизлучаемый в пространство тепловой поток с учетом прозрачности внешней среды:

$$k\rho\frac{\gamma M}{r}\frac{dr}{dt} = \varepsilon_0\varepsilon_1\sigma[T^4 - T_1^4] + \rho c_P[T - T_1]\frac{dr}{dt}, \quad (8)$$

где  $\rho$  — плотность вещества;  $G$  — гравитационная постоянная;  $M$  — масса растущей планеты;  $r$  — ее радиус;  $T$  и  $T_1$  — соответственно температура тела на границе и внешней среды;  $\varepsilon$  — коэффициент прозрачности среды;  $c_P$  — удельная теплоемкость;  $k$  — доля преобразованной в тепло потенциальной энергии.

На рис. 1 представлены некоторые возможные варианты распределения температуры к моменту времени, когда размер протопланеты достиг 6 200 км. Основное отличие представленных распределений от полученных до сих пор состоит в наличии минимума на значениях  $r = (400 - 500)$  км. К этому времени значительно снизилось содержание короткоживущего  $^{26}\text{Al}$ . Затем, по мере увеличения массы протопланеты, увеличивается роль выделения кинетической энергии при падении аккумулируемых тел и частиц. На завершающем этапе аккумуляции ядра учитывается снижение доли преобразуемой в тепло энергии, обусловленное увеличением доли силикатной

составляющей соударяющихся тел, что приводит к значительному уменьшению температуры формируемых слоев. В этих моделях наличие мощной малопрозрачной атмосферы не учитывалось.

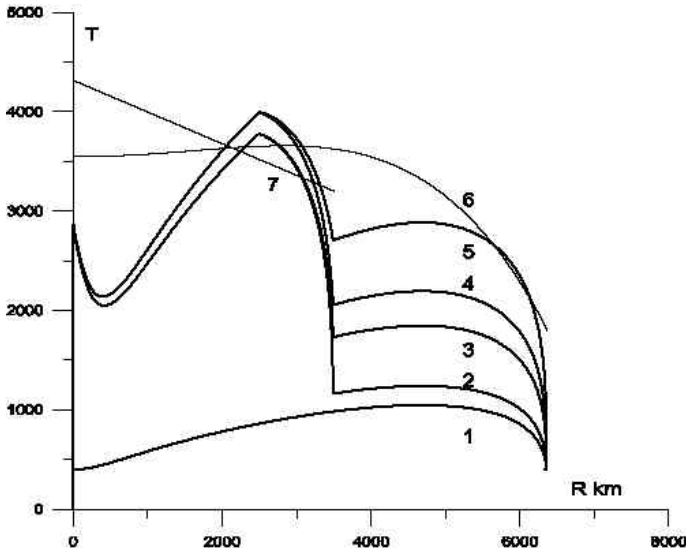


Рис. 1. Возможные варианты распределения температуры к моменту достижения планетой  $R = 6300$  км: 1 — аккумуляция из мелких частиц, выделение тепла короткоживущими радиоактивными элементами не учитывается,  $k$  в области растущего ядра принято  $k = 0.001$ , в области мантии  $k = 0.001$ ; 2 — учитывается выделение тепла короткоживущими радиоактивными элементами,  $k$  в области растущего ядра  $k = 0.3$ , в области мантии  $k = 0.002$ ; 3 —  $k$  в области растущего ядра  $k = 0.4$ , в области мантии  $k = 0.01$ ; 4 —  $k$  в области растущего ядра  $k = 0.4$ , в области мантии  $k = 0.02$ ; 5 —  $k$  в области растущего ядра  $k = 0.5$ , в области мантии  $k = 0.05$ ; 6 — зависимость температуры плавления силикатного вещества мантии от давления [3]; 7 — зависимость температуры плавления вещества ядра от давления [12]

На рис. 2 показаны предварительные результаты наличия плотной атмосферы. Согласно оценкам, приведенным в [13], оптическая мощность протопланетного облака в зоне питания может достигать  $\beta = 10^{-7} \text{ см}^{-1}$ .

Как видно из результатов, представленных на рис. 2, уменьшение прозрачности первичной атмосферы приводит к снижению плотно-

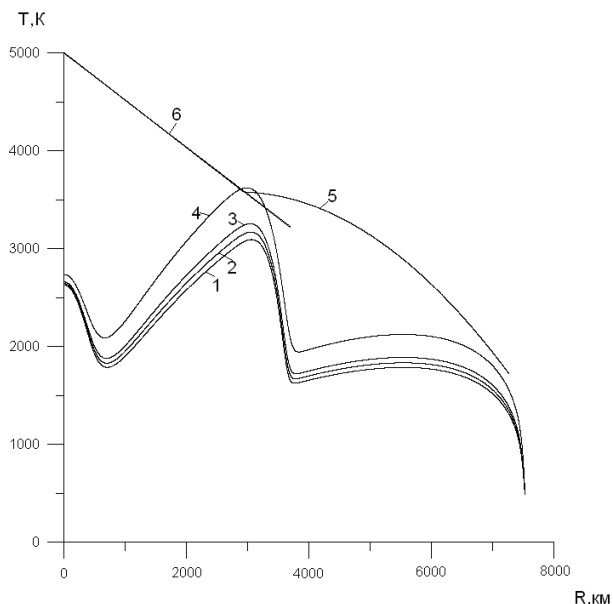


Рис. 2. Распределение температуры в модели Земли при достижении ею современного значения массы для  $\rho = 3.3 \text{ г/см}^3$ : (1) —  $\varepsilon_1 = 0.1$ ; (2) —  $\varepsilon_1 = 0.09$ ; (3) —  $\varepsilon_1 = 0.08$ ; (4) —  $\varepsilon_1 = 0.05$ ; (5) — температура плавления мантии; (6) — температура плавления ядра к окончанию аккумуляции

сти уходящего теплового потока и увеличению температуры внутренних оболочек. В отличие от результатов, описанных в [6, 7], здесь температуры на границе Земля—воздух достигают своего наибольшего значения ко времени завершения формирования железного ядра и наибольшей плотности силикатной фракции в атмосфере.

## Заклучение

Для предложенного нами ранее механизма неоднородной аккумуляции выполнено моделирование эволюции температуры в растущей планете. Показано, что до размеров «зародыша» около 400 км распад короткоживущих радиоактивных элементов является определяющим источником внутренней энергии. Затем основным источником становится часть потенциальной гравитационной энергии, превра-

щающаяся в тепло в процессе удара падающих тел. Это поглощение более эффективно при объединении расплавленных железных частей протопланетных тел. Учет этого обстоятельства позволил выделить модели, в которых большая часть области современного железного внешнего ядра оказывается расплавленной к окончанию аккумуляции планеты. Снимается проблема раннего наличия геомагнитного поля. Предварительные оценки наличия плотной, малопрозрачной атмосферы приводит к увеличению температуры во внутренних областях планеты в процессе ее аккумуляции.

Авторы выражают благодарность Е. А. Запрудной за участие в первичных оценках.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 09-05-00983.

## Список библиографических ссылок

1. Сафронов В. С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. — М. : Наука, 1969. — С. 244.
2. Витязев А. В., Печерникова Г. В., Сафронов В. С. Планеты земной группы: происхождение и ранняя эволюция. — М. : Наука, 1990. — С. 296.
3. Kaula E. M. Thermal evolution of Earth and Moon growing by planetesimal impacts // J. Geophys. Res. — 1979. — Vol. 84. — P. 999—1008.
4. Хачай Ю. В. Численное моделирование распределения начальной температуры в Земле // Ядерно-геофизические и геотермические исследования. — Свердловск : УНЦ АН СССР, 1987. — С. 38—44.
5. Jacobsen S., Yin Q. Models of planetary accretion and core formation based on the Hf-W clock // Geophys. Res. Abs. — 2003. — Vol. 5. — P. 13884.
6. Hayashi C., Nakazawa K., Mizuno H. Earth's melting due to the blanket-ing effect of primordial dense atmosphere // Earth and Planetary Science Letters. — 1979. — Vol. 43. — P. 22—28.
7. Abe Y. Thermal and chemical evolution of the terrestrial magma ocean // Phys. Earth and Planet. Inter. — 1997. — Vol. 100. — P. 27—39.
8. Анфилогов В. Н., Хачай Ю. В. Возможный вариант дифференциации вещества на начальном этапе формирования Земли // ДАН. — 2005. — Т. 403, вып. 6. — С. 803—806.
9. Печерникова Г. В., Витязев А. В. // Катастрофические воздействия космических тел. — М. : Академнига, 2005. — С. 251—265.



10. *Khachay Y., Anfilogov V.* Variants of temperature distributions in the Earth on its accumulation // The study of the Earth as a planet by methods of geophysics, geodesy, and astronomy . — Kiev : Naukova Dumka, 2009.
11. *Самарский А. А., Моисеенко Б. Д.* // Журн. вычислит. математики и мат. физики. — 1965. — Т. 5, вып. 5. — С. 816—827.
12. *Стейси Ф. Д.* Физика Земли. — М. : Мир, 1972. — С. 342.
13. *Шапкин А. И., Сидоров Ю. И.* Термодинамические модели в космохимии и планетологии. — М. : Едиториал. УРСС, 2004. — С. 336.

## ТОЧНЫЕ ОЦЕНКИ ОБЩЕГО ЧЛЕНА РЯДА ЛАПЛАСА ДЛЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА

Основным представлением гравитационного потенциала небесных тел служит ряд Лапласа по шаровым функциям  $V_n$ . Известно, что для тел нерегулярной структуры последовательность  $V_n$  на объемлющей сфере мажорируется последовательностью  $Cn^{-\sigma}$  при  $\sigma = 5/2$ . Как показывают простые примеры, оценка достигается для тел, соприкасающихся с объемлющей сферой по куску поверхности (полушар, сферический сектор) или по кривой (цилиндр). Здесь мы установим, что эта оценка допускает усиление для тел, имеющих с объемлющей сферой конечное множество общих точек, и в этом случае  $\sigma = 3$ . Скорее всего, для Земли, Луны, планет земной группы, спутников и астероидов значение показателя  $\sigma$  близко к трем.

The main type of representation of the gravitational potential of celestial bodies is the Laplace series in spherical harmonics  $V_n$ . It is well known that the sequence  $V_n$  on the enveloping sphere is majorized by the sequence  $Cn^{-\sigma}$  with  $\sigma = 5/2$  for bodies of irregular structure. Simple examples show that the estimate is attainable for bodies having a common piece of a surface (hemisphere, spherical sector) or having a common piece of a curve (cylinder) with the enveloping sphere. Here we establish that this estimate admits an extension for bodies having a finite set of points lying on the enveloping sphere, and  $\sigma = 3$  in this case. We suggest that the value of the exponent  $\sigma$  is close to 3 for the Earth, the Moon, terrestrial planets, regular satellites, and asteroids.

### Введение

Представление гравитационного потенциала Земли и других небесных тел рядом Лапласа по шаровым функциям является в настоящее время основным и наиболее широко используемым [1]. Альтернативные представления (см., например, [2]) применяются редко. Современные модели геопотенциала [3, 4], содержат огромное количество сферических гармоник, до нескольких тысяч. Это требует

детального знания поведения ряда — как минимум оценок общего члена и остатка. Такие оценки приведены в [5] для тел различной степени гладкости. Там же на примерах показано, что эти оценки неулучшаемы в следующем смысле. Существуют просто устроенные тела, для которых достигается степенной порядок оценок. Однако на прошлой коуровской конференции мы привели пример тела (шар с конечным числом однородных конических гор), для которого ряд Лапласа сходится быстрее [6].

С точки зрения логики разумно для интересующей нас величины сначала вывести оценку, а затем доказать ее точность (если она является точной). Но реальные пути развития науки извилисты. Год назад в [6] мы фактически установили точность оценки, которую получили только недавно и представляем здесь. Скорее всего, именно эта оценка осуществляется для Земли, Луны, планет земной группы, спутников и астероидов (с различными константами для каждого небесного тела, разумеется).

## Разложение потенциала по шаровым функциям

Гравитационный потенциал трехмерного тела  $T$  в точке  $Q$  пространства  $\mathbb{R}^3$  вне объемлющей тело сферы  $S$  радиуса  $R$  можно представить рядом Лапласа по шаровым функциям  $V_n$ :

$$V = \sum_{n=0}^{\infty} V_n, \quad V_n(r, \theta, \lambda) = \frac{MR^n}{r^{n+1}} Y_n(\theta, \lambda). \quad (1)$$

Здесь  $r, \theta, \lambda$  — сферические координаты,  $M$  — масса тела. Безразмерные сферические функции  $Y_n$  определяются интегралом:

$$Y_n = \frac{1}{MR^n} \int_T r'^n P_n(\cos H) \varrho(Q') d\tau'. \quad (2)$$

Здесь  $P_n$  — многочлен Лежандра со стандартной нормировкой  $P_n(1) = 1$ ,  $H$  — угол между векторами  $OQ = \mathbf{r}$  и  $OQ' = \mathbf{r}'$ ,  $\varrho(Q')$  — плотность,  $d\tau'$  — элемент объема; постоянная тяготения принята равной единице.

*Замечание.* Объемлющая сфера с центром в центре масс Земли проходит через вершину горы Чимборасо. Последняя представляет собой потухший вулкан приблизительно конической формы (рис. 1) высотой  $h = 6$  км ( $h/R = 10^{-3}$ ). В указанном шаровом слое глубиной  $h = 6$  км помещается еще несколько гор меньшей высоты, в

частности, действующий вулкан Котопахи, еще больше напоминающий правильный конус.



*a*



*б*

Рис. 1. Чимборасо, 6 310 м над уровнем моря (*a*) и Котопахи, 5 897 м над уровнем моря (*б*)

Для практических целей сферические функции представляют линейными комбинациями элементарных сферических гармоник

$$Y_n = \sum_{k=0}^n P_n^k(\cos \theta) (C_{nk} \cos k\lambda + S_{nk} \sin k\lambda)$$

с постоянными Стокса (гармоническими коэффициентами)  $C_{nk}, S_{nk}$ . Но в теории предпочтительнее иметь дело с интегралом (2).

## Оценки общего члена ряда Лапласа в зависимости от степени гладкости структуры тела

Прежде чем переходить к новым оценкам, изложим для полноты картины старые результаты Холшевникова—Антонова, доказательства которых можно найти в [5].

Если структура тела имеет конечную степень гладкости, то справедлива оценка

$$|Y_n| \leq \frac{C}{n^\sigma}. \quad (3)$$

Постоянная  $C$  находится по некоторой норме функции  $\varrho$ , а показатель  $\sigma$ , указывающий на скорость убывания сферических гармоник, определяется степенью гладкости  $\varrho$ . Надо сказать, что понятие степени гладкости для теории потенциала весьма специфично. Для тела сферической структуры, например, плотность может быть разрывной даже на счетном множестве сфер. Важно лишь, что на любой сфере плотность постоянна. Напрашивается предположение (оказавшееся верным), что сферы можно заменить гладкими поверхностями, а постоянство плотности — ее гладкостью на этих поверхностях.

Перейдем к точным формулировкам. Ограничимся лишь телами, поверхность которых пересекается с каждым центральным лучом ровно в одной точке. Иными словами, поверхность тела можно задать уравнением

$$r = w(\theta, \lambda). \quad (4)$$

*Замечание.* Рассмотрение лишь поверхностей вида (4) не очень ограничительно. Дело в том, что интегрирование в (2) по шару радиуса  $\bar{R} < R$  дает вклад в  $Y_n$  менее  $(\bar{R}/R)^n$ , что представляет собой бесконечно малую более высокого порядка, чем правая часть (3). Так что можно ограничиться интегрированием по близиповерхностному слою. Например, если  $T$  — тор, то его поверхность при  $r > \bar{R}$  при достаточно большом  $\bar{R}$  представима в виде (4).

*Теорема 1.* Если функции  $w(\theta, \lambda)$ ,  $\varrho(rw(\theta, \lambda), \theta, \lambda)$ , рассматриваемые при фиксированном  $r$ ,  $0 < r \leq R$ , как функции на единичной сфере  $(\theta, \lambda)$ , обладают степенью гладкости  $s$  с независимой от  $r$  нормой производных, то справедлива оценка (3) при  $\sigma = (s + 3)/2$ .

Если структура тела аналитична, то оценка (3) существенно улучшается. Как обычно, для количественной оценки следует продолжить функцию  $w$  в комплексную область. Сначала надо продолжить ее до функции на всей вещественной плоскости  $(\theta, \lambda)$  по правилам

$$w(\theta, \lambda + 2\pi) = w(\theta + 2\pi, \lambda) = w(-\theta, \lambda + \pi) = w(\theta, \lambda),$$

а затем считать ее функцией комплексной переменной  $\theta$  в области  $|\Im \theta| < a$  при некотором  $a > 0$  и фиксированных  $r, \lambda$ . Та же операция продлевается с функцией  $\varrho(rw(\theta, \lambda), \theta, \lambda)$ .

*Теорема 2.* Пусть функции  $w(\theta, \lambda)$ ,  $\varrho(rw(\theta, \lambda), \theta, \lambda)$  при фиксированном  $r$ ,  $0 < r \leq R$ , и произвольном выборе полюса единичной сферы  $(\theta, \lambda)$  при каждом вещественном  $\lambda$  голоморфны и равномерно ограничены в полосе  $|\Im \theta| < a$ . Тогда справедлива оценка

$$|Y_n| \leq \frac{Cp^n}{n^{3/2}} \quad (5)$$

при некотором  $p < 1$ .

Реальные небесные тела имеют либо аналитическую структуру (газовые фигуры равновесия типа планет-гигантов и звезд), либо иррегулярную структуру, т. е. гладкую структуру степени гладкости ноль (планеты земной группы, спутники, астероиды). При  $s = 0$  теорема 1 допускает усиление и некоторое упрощение. Достаточно за поверхность тела принять сферу  $r = R$ , полагая  $\varrho = 0$  вне  $T$ .

*Теорема 3.* Пусть функция  $\varrho(r, \theta, \lambda)$  ограничена и при фиксированном  $r$ ,  $0 < r \leq R$ , и произвольном выборе полюса единичной сферы  $(\theta, \lambda)$  на каждом меридиане  $\lambda = \text{const}$  есть функция равномерно ограниченной вариации. Тогда справедлива оценка (3) при  $\sigma = 5/2$ .

Как показано в [6] на примерах, оценка теоремы 3 достигается для тел, соприкасающихся с объемлющей сферой по куску поверхности (полушар, сферический сектор) или по кривой (цилиндр). Здесь мы покажем, что она допускает усиление для тел, имеющих с  $S$  конечное множество общих точек.

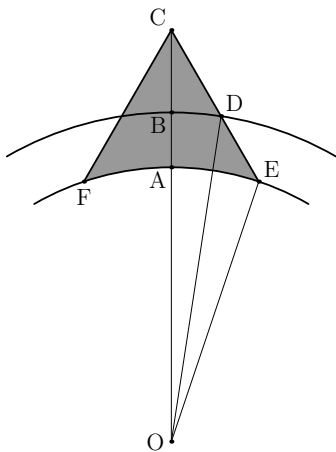
## Геометрия конического тела

Рассмотрим тело, представляющее собой круговой конус со сферическим дном (рис. 2), где изображено его сечение  $CEF$  плоскостью, проходящей через ось симметрии. Здесь  $C$  — вершина конуса,  $CE$  и  $CF$  — образующие,  $EAF$  — дуга окружности с центром в  $O$ . Будем называть  $T$  коническим телом.

Исследуем его геометрию. Обозначим

$$OA = a, \quad OC = R, \quad \angle OCE = \alpha, \quad \angle COE = \varphi, \quad \angle CEO = \psi.$$

Можно представить себе, что коническая поверхность поставлена на сферу радиуса  $a$ . Угол  $\psi$  в общем случае тупой, но в предельном случае может равняться  $\pi/2$  (рис. 3). В дальнейшем считаем  $\psi > \pi/2$ , в некоторых случаях допуская  $\psi = \pi/2$ . Считаем  $a, R, \alpha$  независимыми величинами. Потребуем  $0 < a < R$ . Угол  $\alpha$  может изменяться от



$$\begin{aligned}
 OA = OE &= a, \\
 OB = OD &= r, \\
 OC &= R, \\
 \angle OCE &= \alpha, & 0 < \alpha < \pi/2, \\
 \angle COE &= \varphi(a), \\
 \angle COD &= \varphi(r), & 0 < \varphi < \pi/2, \\
 \angle CEO &= \psi, & \pi/2 < \psi < \pi.
 \end{aligned}$$

Рис. 2. Коническое тело  $T$

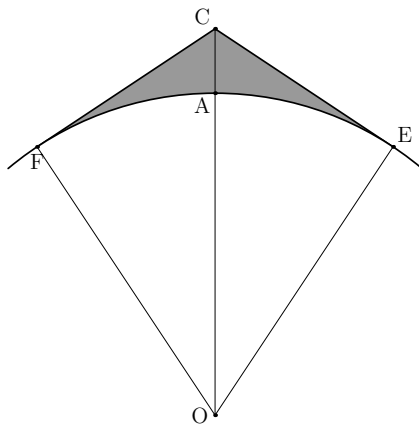


Рис. 3. Предельный случай конического тела при  $\psi = \pi/2$

нуля (когда  $T$  вырождается в отрезок  $AC$ ) до  $\alpha^*$  (когда угол  $\psi$  обращается в  $\pi/2$ ). Из треугольника  $OCE$  (рис. 3)  $R \sin \alpha^* = a$ . Таким образом, параметры  $a, R, \alpha$  изменяются в области

$$0 < a < R, \quad 0 < \alpha < \alpha^*, \quad \text{при} \quad \alpha^* = \arcsin \frac{a}{R}. \quad (6)$$

Из треугольника  $CEO$

$$\frac{\sin \alpha}{a} = \frac{\sin \psi}{R} = \frac{\sin(\pi - \alpha - \varphi)}{R} = \frac{\sin(\alpha + \varphi)}{R}.$$

Отсюда

$$\sin \psi = \frac{R}{a} \sin \alpha, \quad \frac{\pi}{2} < \psi < \pi, \quad (7)$$

$$\varphi = \arcsin \left( \frac{R}{a} \sin \alpha \right) - \alpha, \quad (8)$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{a} \sin^2 \alpha + \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{R^2}{a^2} \sin^2 \alpha}, \quad (9)$$

$$\sin \varphi = \sin \alpha \left( \frac{R}{a} \cos \alpha - \sqrt{1 - \frac{R^2}{a^2} \sin^2 \alpha} \right).$$

Из геометрических соображений ясно, что  $\varphi$  возрастает вместе с  $\alpha$ , поэтому

$$0 < \varphi < \varphi^* = \frac{\pi}{2} - \alpha^* = \arccos \frac{a}{R}.$$

Найдем объем  $\tau$  тела вращения  $T$ . Как известно,

$$\tau = 2\pi \iint r^2 \sin \theta \, dr \, d\theta, \quad (10)$$

где интеграция проводится по криволинейному треугольнику  $ACE$ . При фиксированном  $r$  интегрирование по  $\theta$  проводится вдоль дуги окружности  $BD$  в пределах от  $\theta = 0$  до угла  $COD$  (рис. 2). Если обозначить правую часть (8) через  $\varphi(a)$ , то угол  $COD$  представляется как  $\varphi(r)$ . Таким образом,

$$\tau = 2\pi \int_a^R r^2 \, dr \int_0^{\varphi(r)} \sin \theta \, d\theta. \quad (11)$$

Внутренний интеграл (11) элементарен:

$$\int_0^{\varphi(r)} \sin \theta \, d\theta = 1 - \cos \varphi = 1 - \frac{R}{r} \sin^2 \alpha - \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{R^2}{r^2} \sin^2 \alpha}. \quad (12)$$



Ниже нам понадобится оценка интеграла (12). Покажем, что

$$\int_0^{\varphi(r)} \sin \theta \, d\theta \leq \frac{\sin^2 \alpha}{1 - \sin \alpha} \left( \frac{R}{r} - 1 \right)^2. \quad (13)$$

Обозначим временно  $x = R/r$  и образуем разность  $F(x)$  правых частей (13) и (12):

$$F(x) = \sin^2 \alpha (1 - \sin \alpha)^{-1} (x - 1)^2 + x \sin^2 \alpha + \cos \alpha \sqrt{1 - x^2 \sin^2 \alpha} - 1.$$

Вычислим производные

$$F'(x) = \sin^2 \alpha \left[ \frac{2(x - 1)}{1 - \sin \alpha} + 1 - \frac{x \cos \alpha}{\sqrt{1 - x^2 \sin^2 \alpha}} \right],$$

$$F''(x) = \sin^2 \alpha \left[ \frac{2}{1 - \sin \alpha} - \frac{\cos \alpha}{(1 - x^2 \sin^2 \alpha)^{3/2}} \right].$$

Вторая производная убывает, причем

$$F''(1) = \operatorname{tg}^2 \alpha (1 + 2 \sin \alpha) > 0, \quad F''\left(\frac{1}{\sin \alpha}\right) = -\infty.$$

Поэтому в промежутке  $(0, 1/\sin \alpha)$  найдется такая точка  $x_0$ , что  $F'(x)$  возрастает вплоть до  $F'(x_0)$ , а затем убывает вплоть до  $F'(1/\sin \alpha) = -\infty$ . Так как  $F'(1) = 0$ , то наименьшее значение  $F(x)$  принимает в одной из концевых точек  $x = 1$  или  $x = 1/\sin \alpha$ . Поскольку  $F(1) = F(1/\sin \alpha) = 0$ , то  $F(x) \geq 0$ , что и требовалось.

Поведение  $F(x)$  иллюстрирует рис. 4.

Вернемся к вычислению объема  $T$ . Наружный интеграл (11) оказывается также элементарным:

$$\tau = \frac{\pi}{3} \left[ 2r^3 - 3Rr^2 \sin^2 \alpha - 2 \cos \alpha (r^2 - R^2 \sin^2 \alpha)^{3/2} \right]_{r=a}^{r=R}.$$

Окончательно,

$$\tau = \frac{\pi R^3}{3} \left[ \sin^2 \alpha \cos 2\alpha + 2 \cos \alpha (\nu^2 - \sin^2 \alpha)^{3/2} + 3\nu^2 \sin^2 \alpha - 2\nu^3 \right], \quad (14)$$

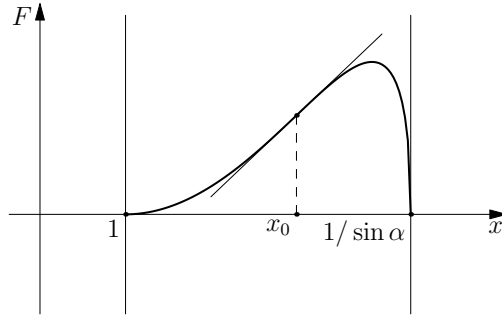


Рис. 4. График  $F(x)$  при  $\alpha = \pi/6$

где  $\nu = a/R$ . Из геометрических соображений ясно, что  $\tau$  возрастает вместе с  $\alpha$ . Асимптотика легко находится как при малых  $\alpha$ :

$$\tau = \frac{\pi R^3}{3} (1 - \nu)^3 \sin^2 \alpha \left( 1 + \frac{3 + \nu}{4\nu} \sin^2 \alpha + \dots \right), \quad (15)$$

так и при  $\alpha$ , близких к  $\alpha^* = \arcsin \nu$

$$\tau = \frac{\pi R^3}{3} \nu^2 (1 - \nu)^2 \left[ 1 - \frac{1 + \nu}{\nu^2 (1 - \nu)} \beta^2 + \frac{2\sqrt{1 + \nu}}{\nu^2 (1 - \nu)^{3/2}} \beta^3 + \dots \right], \quad (16)$$

где  $\beta = \sqrt{\nu^2 - \sin^2 \alpha}$ .

## Ряд Лапласа конического тела

Пусть коническое тело  $T$  обладает интегрируемой ограниченной плотностью  $\varrho(r, \theta, \lambda) \leq \varrho^*$ , зависящей в общем случае от всех трех сферических координат. Гравитационный потенциал  $T$  представляется рядом Лапласа (1) со сферическими функциями (2). Представим последние в виде

$$\begin{aligned} MR^n Y_n(\theta, \lambda) = \int_a^R r'^{n+2} dr' \int_0^{\varphi(r')} \sin \theta' d\theta' \times \\ \times \int_0^{2\pi} \varrho(r', \theta', \lambda') P_n(\cos H) d\lambda'. \end{aligned} \quad (17)$$

Пусть плотность  $\varrho$  ограничена  $\varrho \leq \varrho^*$ . Так как  $|P_n(\cos H)| \leq 1$ , то внутренний интеграл легко оценивается

$$\left| \int_0^{2\pi} \varrho(r', \theta', \lambda') P_n(\cos H) d\lambda' \right| < 2\pi \varrho^*.$$

Далее, опуская штрихи у переменных интегрирования, в понятных обозначениях

$$\left| \int_0^{\varphi(r)} \sin \theta d\theta \right| < 2\pi \varrho^* \int_0^{\varphi(r)} \sin \theta d\theta,$$

что, согласно (13), не превосходит

$$\frac{2\pi \varrho^* \sin^2 \alpha}{1 - \sin \alpha} \left( \frac{R}{r} - 1 \right)^2.$$

Подставляя в (17), получим

$$M|Y_n| < \frac{2\pi \varrho^* \sin^2 \alpha}{R^n(1 - \sin \alpha)} \int_a^R r^{n+2} \left( \frac{R}{r} - 1 \right)^2 dr.$$

Последний интеграл равен

$$\begin{aligned} \int_a^R (R^2 r^n - 2Rr^{n+1} + r^{n+2}) dr &= \frac{2R^{n+3}}{(n+1)(n+2)(n+3)} - \\ &- a^{n+1} \left[ \frac{R^2}{n+1} - \frac{2Ra}{n+2} + \frac{a^2}{n+3} \right]. \end{aligned}$$

Выражение в квадратных скобках при  $R \geq a$  возрастает вместе с  $R$ . Заменяя это выражение его значением при  $R = a$ , мы увеличим интеграл:

$$\int_a^R r^{n+2} \left( \frac{R}{r} - 1 \right)^2 dr < \frac{2}{(n+1)(n+2)(n+3)} (R^{n+3} - a^{n+3}). \quad (18)$$

В результате

$$M|Y_n| < \frac{4\pi R^3 \sin^2 \alpha}{1 - \sin \alpha} \frac{\varrho^*(1 - \nu^{n+3})}{(n+1)(n+2)(n+3)}. \quad (19)$$

Заметим, что знаменатель в (19) в нуль не обращается, так как  $\sin \alpha \leq \nu$ .

Полагая  $M = \bar{\varrho}\tau$ , где  $\bar{\varrho}$  — средняя плотность тела  $T$ , получим оценку сферической гармоник

$$|Y_n| < C \frac{1 - \nu^{n+3}}{(n+1)(n+2)(n+3)} < \frac{C}{n^3} \quad (20)$$

при

$$C = \frac{4\pi R^3 \varrho^* \sin^2 \alpha}{\tau \bar{\varrho} (1 - \sin \alpha)}. \quad (21)$$

В силу (15) постоянная  $C$  не исчезает при  $\alpha = 0$ . Приведем ее значения при малых  $\alpha$  и при малых  $\beta$ :

$$C = \frac{12\varrho^*}{(1-\nu)^3 \bar{\varrho}} \left[ 1 + \sin \alpha - \frac{3(1-\nu)}{4\nu} \sin^2 \alpha + \dots \right], \quad (22)$$

$$C = \frac{12\varrho^*}{(1-\nu)^3 \bar{\varrho}} \left[ 1 + \frac{3}{2\nu(1-\nu)} \beta^2 + \dots \right]. \quad (23)$$

Полученный результат сформулируем в виде теоремы.

*Теорема 4.* Для ряда Лапласа вышеописанного конического тела справедлива оценка (3) при  $\sigma = 3$ .

## Шар с семейством конических гор

Рассмотрим теперь тело  $T$ , представляющее собой шар  $T_0$  радиуса  $a$ , на северном полюсе которого поставлено коническое тело  $T_1$  (в предыдущих разделах оно обозначалось буквой  $T$ ), так что  $T = T_0 \cup T_1$ . Пусть шар имеет сферическую структуру, а его масса равна  $M_0$ . Характеристики тела  $T_1$ , кроме  $R$ , будем отмечать индексом 1.

Ряд Лапласа шара состоит только из начального члена. Ниже считаем  $n \geq 1$ . Формула (19) сохраняет силу с точностью до обозначений:  $M, \varrho^*, \alpha$  следует заменить на  $M_0 + M_1, \varrho_1^*, \alpha_1$ . Оценки (20, 21) перейдут в

$$|Y_n| < C_1 \frac{1 - \nu^{n+3}}{(n+1)(n+2)(n+3)} < \frac{C_1}{n^3}, \quad (24)$$

$$C_1 = \frac{4\pi R^3 \varrho_1^* \sin^2 \alpha_1}{(M_0 + M_1)(1 - \sin \alpha_1)}. \quad (25)$$

Рассмотрим предыдущую конструкцию в произвольно ориентированной системе отсчета с началом в центре масс  $O$  шара  $T_0$ . Иными

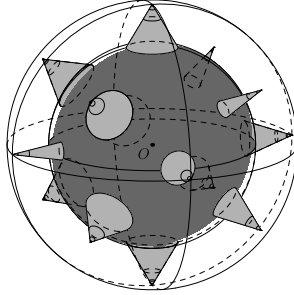


Рис. 5. Шар с несколькими коническими горами

словами, коническое тело  $T$  помещается над произвольной точкой  $A$  шара  $T_0$ . Поскольку сферические гармоники инвариантны относительно вращений, оценки (24, 25) сохраняют силу.

Наконец, рассмотрим семейство  $\{T_s\}$ ,  $s = 1, 2, \dots, k$ , конических тел, поставленных в произвольных точках  $A_s$  на шар  $T_0$ , так что  $T = T_0 \cup T_1 \cup \dots \cup T_k$  (рис. 5). Расстояние  $R$  вершин всех конусов от центра шара примем одинаковым, тогда как углы  $\alpha_s$  и плотности  $\varrho_s$  могут зависеть от  $s$ . Тела  $T_s$  могут и пересекаться. В общей части плотность фактически равна сумме плотностей пересекающихся тел.

В силу аддитивности потенциала

$$MY_n = \sum_{s=1}^k M_s Y_{ns}, \quad M|Y_n| \leq \sum_{s=1}^k M_s |Y_{ns}|,$$

где  $Y_n, Y_{ns}$  — гармоники степени  $n$  тел  $T$  и  $T_s$  соответственно.

Оценка (24) сохраняет силу при

$$C_1 = \frac{4\pi R^3}{M_0 + M_1 + \dots + M_k} \sum_{s=1}^k \frac{\varrho_s^* \sin^2 \alpha_s}{1 - \sin \alpha_s}. \quad (26)$$

## Заключение

Нами построено семейство тел, общий член ряда Лапласа которых удовлетворяет оценке (3) при  $\sigma = 3$ .

Каждое тело семейства представляет собой шар с конечным числом конических гор. На плотность гор наложены лишь условия интегрируемости и ограниченности.

Покажем, что указанное семейство можно значительно расширить.

Очевидно, единственным существенным условием является коническая форма гор. Поскольку допускается обращение плотности в нуль, реальная форма гор может быть весьма причудливой. Важно, что вещество отсутствует вне некоторого конуса с углом полураствора  $\alpha < \pi/2$ , ось которого проходит через центр тела  $T_0$ .

Мы приняли, что горы стоят на теле сферической структуры  $T_0$  радиуса  $a < R$ . Ясно, что условие сферической структуры можно отбросить, так как сферические гармоники потенциала шара  $T_0$  при любой его внутренней структуре убывают быстрее правой части (24). Более того, к шару  $T_0$  можно добавить уровненный эллипсоид с большой полуосью  $R$  или любое другое достаточно гладкое тело [5].

Мы приняли расстояние вершин гор от начала отсчета одинаковым. От этого условия тоже можно отказаться, приняв за  $R$  наибольшее из расстояний  $R_s$ .

Окончательный результат сформулируем в виде двух теорем.

*Теорема 5.* Пусть тело  $T$  — шар радиуса  $R$  с интегрируемой ограниченной плотностью  $\varrho$ ;  $\{\tilde{T}_s\}$ ,  $s = 1, 2, \dots, k$  — множество конусов с вершинами, расположенными на расстоянии  $R$  от центра шара  $O$ , осями симметрии, проходящими через  $O$ , и углами полураствора, меньшими  $\pi/2$ ; существует положительное число  $a < R$  такое, что все конусы  $\tilde{T}_s$  пересекаются трансверсально со сферой  $r = a$ ; плотность  $\varrho$  при  $r > a$  равна нулю вне конических тел  $T_s$ , ограниченных сверху конусами  $\tilde{T}_s$ , а снизу — сферой  $r = a$ .

Тогда гравитационный потенциал тела  $T$  вне и на объемлющей сфере  $r = R$  представляется рядом Лапласа (3), общий член которого допускает оценку (3) при  $\sigma = 3$  и некотором  $C$ .

*Теорема 6.* Пусть тело  $T$  представляет собой объединение тела теоремы 5 и гладкого тела, сферические гармоники потенциала которого убывают по крайней мере как  $n^{-\sigma}$  при  $\sigma \geq 3$ .

Тогда для  $T$  справедливо утверждение теоремы 5.

Точность оценок теорем 4–6 показана в [6]. Поскольку вершины гор с хорошим приближением можно считать точками, для Земли, Луны, планет земной группы, спутников и астероидов значение показателя  $\sigma$  близко к трем.

*Замечание.* В [6] вычислена постоянная  $C_1$ , определяемая геометрией масс горы Чимборасо. Мы с удивлением констатировали ее огромную величину (примерно  $1/4$ ), тогда как масса горы составляет лишь около  $4 \cdot 10^{-9}$  от массы Земли. Приведенная здесь оценка

(24) объясняет это явление. Множитель  $1 - \nu^{n+3}$  в [6] отсутствует, поскольку мы находили асимптотику при  $n \rightarrow \infty$ , когда он обращается в единицу. Между тем при небольших  $n$  он мал, поскольку  $\nu = 0.999016$ . Так, при  $n = 10$  и  $n = 100$  множитель  $1 - \nu^{n+3}$  равен 0.013 и 0.096 соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы проведения фундаментальных исследований СПбГУ по приоритетным направлениям (грант 6.37.110.2011) и РФФИ (грант 11-02-00232-а).

## Список библиографических ссылок

1. Холшевников К. В. Представление гравитационного потенциала рядом Лапласа: область применимости // Физика космоса : Тр. 37-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 28 янв. — 1 февр. 2008 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2008. — С. 195—205.
2. Антонов В. А., Тимошкова Е. И., Холшевников К. В. Сравнительные свойства различных представлений гравитационного поля Земли // Изучение Земли как планеты методами астрономии, геодезии и геофизики. — Киев : Наук. думка, 1982. — С. 93—106.
3. Шайдулин В. Ш. Исследование некоторых свойств ряда Лапласа для гравитационного потенциала Земли // Физика космоса : Тр. 37-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 28 янв. — 1 февр. 2008 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2008.
4. Pavlis N. K., Holmes S. A., Kenyon S. C., Factor J. K. An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008, presented at the 2008 // General Assembly of the European Geosciences Union. — April 13–18, 2008.
5. Антонов В. А., Тимошкова Е. И., Холшевников К. В. Введение в теорию ньютоновского потенциала. — М. : Наука, 1988. — С. 272.
6. Холшевников К. В., Шайдулин В. Ш. О точности оценок Холшевникова — Антонова общего члена ряда Лапласа // Физика космоса : Тр. 40-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 31 янв. — 4 февр. 2011 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2011. — С. 229—240.

## ОБРАЗОВАНИЕ ПЕРВЫХ ГАЛАКТИК

Обсуждается процесс образования первых галактик, начиная с образования минигало темной материи до формирования современных галактик, включая процессы образования и эволюции первых звезд (населения III). Дается обзор современных наблюдений экстремально далеких галактик и низкометаллических звезд в нашей Галактике.

We discuss the formation of first galaxies beginning from the dark matter minihalos to present galaxies, including the formation and evolution of the first generation of stars (Population III). We review the recent achievements in the observations both galaxies at high redshifts and extremely metal — poor stars in our Galaxy.

### Введение

Вопрос об образовании первых галактик (ПГ), сформировавшихся спустя несколько сотен миллионов лет после Большого взрыва, является одним из ключевых во всей астрофизике.

В рамках  $\Lambda$ CDM модели первые гравитационно-связанные структуры (так называемые маломассивные гало темной материи) образовывались вскоре после Большого взрыва в результате гравитационной неустойчивости флуктуаций плотности.

Барионный газ, средняя плотность которого была на порядок ниже, чем плотность темной материи, «подчинялся» гравитационному воздействию темного вещества, накапливаясь в гало. Структуры, состоящие из темного гало и накопленного в них барионного газа, часто называют первыми гравитационно-связанными объектами. Иногда их также называют «протогалактиками» (см. раздел «Что такое первые галактики?»).

Гало темной материи сливались иерархическим образом. Они приобретали угловой момент посредством приливных взаимодействий [1, 2]. Газ, содержащийся в гало, будучи диссипативным компонентом, охлаждался и скапливался в центральных частях. Позже



из сгустков этого газа могли образоваться первые звезды. Так происходил процесс образования первых галактик, которые в дальнейшем послужили строительными элементами для современных галактик.

Потенциальная возможность обнаружения первых галактик, изначально рассмотренная в работе [3], породила всплеск интереса к этому вопросу. В настоящее время данная тема является одной из наиболее популярных в астрофизике (см., например, [4–6]). В немалой степени это также связано с тем, что современные телескопы, такие как 10-м телескопы им. Кека или Космический телескоп им. Хаббла (КТХ), позволяют разглядеть галактики, сформировавшиеся спустя всего  $\sim 500$  млн лет после Большого взрыва. Еще больше ценной информации о первых галактиках могут дать такие инструменты, как ALMA (Atakama Large Millimeter Array) и космический телескоп JWST (James Webb Space Telescope).

Процесс образования первых галактик неразрывно связан с образованием первых звездных объектов (первых звезд), которые сформировались из газа, скапливающегося в центрах гало темной материи. Такие первые звезды (ПЗ) также называют звездами населения III. Эти экзотические объекты образовывались из водородно-гелиевого газа, без примеси других элементов, поэтому были чрезвычайно массивные ( $\sim 100\text{--}300 M_{\odot}$ ) и заканчивали свою жизнь либо как черные дыры, либо как аннигиляционно-неустойчивые сверхновые (англ. *PISN*).

Ниже мы более подробно рассмотрим процесс образования первых галактик и их эволюцию — рождение первых звезд, слияние галактик, начальное химическое обогащение вещества, а также обсудим возможности обнаружения в наше время свидетельств существования в прошлом этих интересных объектов.

## Что такое первые галактики?

В данном разделе мы конкретизируем понятие первых галактик. В современной литературе встречается весьма много терминов, обозначающих первые галактики: протогалактики, минигало темной материи, экстремально далекие галактики, галактики нулевой металличности (англ. *protogalaxies*, *dark matter minihaloes*, *highest redshift galaxies* и *zero-metallicity galaxies* соответственно). Из такого многообразия названий трудно понять, что именно понимают под термином «первые галактики».

С теоретической точки зрения под первыми галактиками можно понимать объекты, обладающие следующим набором свойств [4]:

- наличие гало темной материи (ГТМ), которое содержит звездную и газовую системы;
- потенциальная яма, создаваемая ГТМ, должна быть достаточно глубока для того, чтобы удерживать газ, нагретый до температур выше  $\sim 10^4$  К в результате фотоионизации излучением первых звезд, от разлета в межгалактическое пространство;
- условия в системе должны быть такими, чтобы поддерживалась многофазная межзвездная среда, обеспечивающая стабильное саморегулируемое звездообразование.

Если принять, что галактика должна удовлетворять всем вышеперечисленным критериям, то просто гало темной материи, содержащие газ, на роль первых галактик не подходят. А вот гало, в котором начался процесс звездообразования, уже вполне может считаться первой галактикой.

С наблюдательной точки зрения под первыми галактиками обычно понимают либо галактики, видимые в настоящее время на максимальных красных смещениях — до  $z \sim 10$  [7, 8], либо галактики, содержащие газ нулевой металличности<sup>1</sup>.

Очевидно, что оба таких «наблюдательных» определения первых галактик не являются правильными. Первое — в силу того, что техника и методы наблюдения постоянно совершенствуются и таким образом мы можем ожидать что будут открыты галактики на еще больших красных смещениях. Второе — потому, что первые звезды, образовавшиеся в таких галактиках, быстро эволюционировали (несколько млн лет) и обогащали газ тяжелыми элементами<sup>!!</sup>.

---

<sup>1</sup> Под металличностью  $Z$  среды понимают относительное содержание того или иного химического элемента (или совокупности нескольких элементов) по отношению к солнечному значению:  $[Z] = \log \left( \frac{M_X}{M_H} \right) - \log \left( \frac{M_X}{M_H} \right)_{\odot}$ , где  $\frac{M_X}{M_H}$  — отношение массы элемента  $X$  в данном объеме к массе водорода, а  $\left( \frac{M_X}{M_H} \right)_{\odot}$  — то же отношение для солнечного вещества.

<sup>!!</sup> Все элементы, тяжелее  $^4\text{He}$ , в астрофизике называются тяжелыми элементами или металлами.

В дальнейшем, говоря о первых галактиках, мы будем подразумевать гало темной материи, в которых содержится газ и происходят процессы звездообразования. При этом предполагается что изначальная металличность газа (до начала звездообразования) равна нулю.

## **Образование первых минигало темного вещества, слияния**

Согласно современным представлениям малые неоднородности плотности материи существовали с самого начала образования Вселенной (говоря о плотности, мы имеем в виду главным образом плотность темного вещества, так как именно оно ответственно за образование структур). Существование этих флуктуаций объясняется в инфляционной теории. Пожалуй, наиболее известным свидетельством существования флуктуаций плотности в ранней Вселенной является анизотропия температуры реликтового излучения.

Изначальные возмущения плотности имели небольшую амплитуду,  $\delta\rho/\rho \sim 10^{-5}$ , однако именно эти небольшие отклонения стали причиной возникновения джинсовской неустойчивости — процесса, ответственного за образование большинства структур во Вселенной. В результате образуется большое число гравитационно связанных объектов (часто называемых «гало темного вещества» (dark matter halo) в широком диапазоне масс. Гало темной материи в результате гравитационного сгущивания («кластеризации») образовали хорошо известную «губчатую» структуру распределения темной материи (рис. 1). Дальнейшая эволюция ансамбля гравитационно связанных объектов протекала иерархическим образом. Спектр масс объектов эволюционировал «снизу-вверх» (bottom-up), т. е. сначала образовались гало наименьших масс, а более массивные структуры формировались путем слияния и аккреции маломассивных гало. Формирование крупных объектов происходило быстро ( $\sim 10^8$  лет).

На нелинейной фазе сжатие объекта определяется только соотношением дисперсии скоростей частиц и массой (гравитационным потенциалом). Являясь бесстолкновительной, система сжимается и старается перейти к равновесной конфигурации, т. е. вириализоваться (при этом соотношение дисперсии скоростей и величины гравитационного потенциала определяется теоремой вириала). Плотность материи в таких объектах в среднем примерно в 200 раз выше фоновой на момент формирования. Распределение образующихся га-

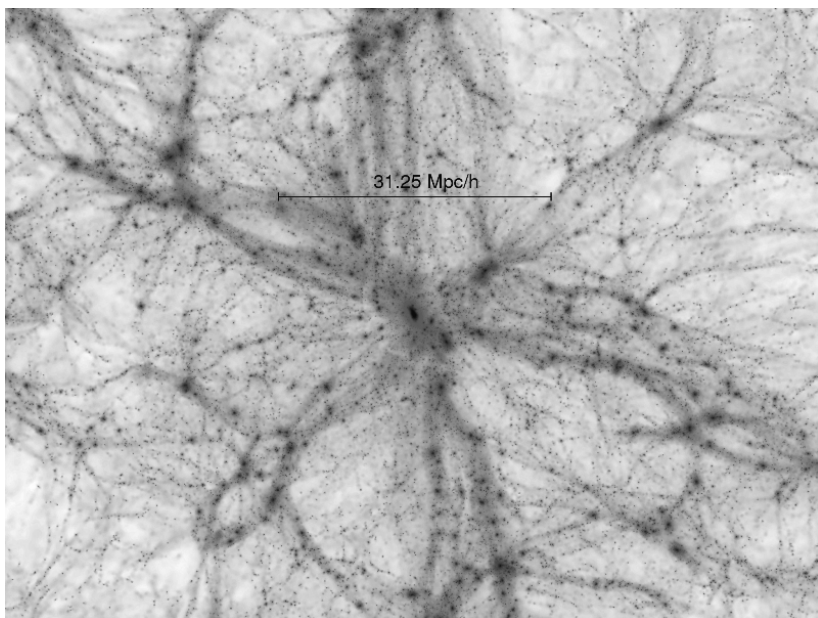


Рис. 1. Губчатая структура, образованная гало темной материи. Результат моделирования Millenium Simulation (рисунок с сайта [http://farm1.static.flickr.com/12/18135101\\_1ef7723b85\\_o.jpg](http://farm1.static.flickr.com/12/18135101_1ef7723b85_o.jpg))

ло по массам можно описать с использованием формулы Пресса—Шехтера [9]

$$N(M)dM = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \left(1 + \frac{n}{3}\right) \frac{\bar{\rho}}{M^2} \left(\frac{M}{M^*}\right)^{(3+n)/6} \exp\left(-\left(\frac{M}{M^*}\right)^{(3+n)/3}\right),$$

где  $\bar{\rho}$  — значение средней плотности во Вселенной (с учетом вклада темной материи и барионов);  $n$  — показатель степени в спектре мощности возмущений;  $M^*$  — величина критической массы, выше которой возможно образование структур ( $M^*$  можно определить как массу Джинса для темного вещества).

В центрах гало темной материи скапливалось барионное вещество (газ). Этот газ имел высокую температуру и плохо охлаждался, что препятствовало началу звездообразования. В достаточно мас-

сивных гало ( $M \sim 10^5 - 10^6 M_\odot$ ), где газ был более плотный, он мог эффективно охлаждаться посредством излучения в линиях молекулярного водорода ( $H_2$  и  $HD$ ) до низких температур ( $\sim 50 - 100$  К), и именно там начиналось звездообразование. Более подробно вопросы охлаждения рассмотрены в обзоре [10]. Можно сказать, что с этого момента возникли первые галактики.

Гало темной материи в плотной ранней Вселенной часто сталкивались и сливались между собой, соответственно сливалось и их барионное содержимое — происходил процесс укрупнения галактик (иерархический рост, сценарий «снизу — вверх»). Этот процесс был эффективен вплоть до эпохи формирования современных галактик ( $z \sim 1$ ). В нашу эпоху столкновения и слияния галактик довольно редкие события.

## Образование современных галактик

Говоря о современных галактиках, мы будем иметь в виду галактики, набравшие в результате серии иерархических слияний достаточно большую массу ( $\sim 10^7 - 10^{12} M_\odot$ ) и, как правило, прошедшие стадию частых слияний.

Сам процесс слияний моделируется с использованием так называемого «дерева слияний» — схемы, показывающей процесс роста крупной галактики из небольших предшественников. Схематично дерево слияний изображено на рис. 2.

В процессе слияний происходило объединение барионной и темной компонент обеих сливающихся галактик. При большой скорости сталкивающихся темных гало они могли и не сливаться, а проходить сквозь друга друга как приведения (напомним что темная материя бесстолкновительная). Барионное вещество, содержащееся в гало, будучи столкновительным по природе, сливалось в любом случае. Процесс объединения барионного вещества обоих гало, по-видимому, сопровождался вспышкой звездообразования из-за возникавших возмущений плотности газа. Таким образом, галактика на протяжении своей истории испытывала многократные вспышки звездообразования.

Как видно из представленной здесь схемы, современные галактики — результат длительной и сложной эволюции, начавшейся с самых первоначальных флуктуаций плотности вещества и продолжающейся в настоящее время.

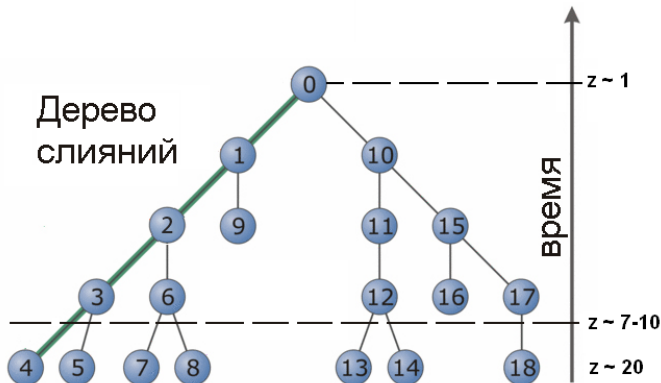


Рис. 2. Дерево слияний. Схематично показан процесс формирования современной галактики (кружочек 0) из 9 предшественников (кружочки 4, 5, 7, 8, 9, 13, 14, 16, 18). После эпохи  $z = 1$  слияния редки. Галактики, лежащие выше штриховой линии  $z \sim 7-10$ , в настоящее время наблюдаются современными телескопами. Галактики, лежащие ниже этой штриховой линии, истинные первые галактики, пока ненаблюдаемы. Изображение схематичное

## Звездное население первых галактик

Известно, что все наблюдаемые в настоящее время звезды имеют в своем составе некоторое количество элементов тяжелее гелия (т. е. металличность таких звезд не равна нулю). Однако из модели первичного нуклеосинтеза следует, что сразу после Большого взрыва образовались только H, D, T,  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^7\text{Li}$  и, возможно,  ${}^7\text{Be}$  [11]. Расчеты показывают, что масса образовавшегося первичного водорода составляла  $\sim 76\%$  от полной массы барионного вещества Вселенной. Оставшиеся  $\sim 24\%$  составлял гелий-4 и ничтожную долю ( $\sim 10^{-10}\%$ ) — более тяжелые элементы [12–14]. Вещество с таким составом, т. е. практически полностью лишенное тяжелых элементов, часто называют «космологическим». Таким образом, первые звезды, образовавшиеся во Вселенной, вовсе не содержали в своем веществе тяжелые элементы и имели металличность, равную нулю. Эти звезды называют звездами населения III или первыми звездами. Именно такие звезды образовывались и взрывались в первых галактиках.

Отсутствие тяжелых элементов в составе определило одну из главных особенностей звезд населения III — их чрезвычайно большую массу (по современным оценкам, они имели массу  $M^* \sim 100\text{--}1\,000 M_\odot$ ). Причиной тому является очень малая непрозрачность газа из космологического вещества, обусловившая низкую эффективность охладителей и высокий темп аккреции на протозвездное ядро [15]. Более подробно механизмы образования звезд населения III будут описаны ниже. По-видимому, эпоха ПЗ была очень короткой — время жизни звезд с такой массой составляло несколько миллионов лет, после чего они выбрасывали в окружающую среду продукты звездного нуклеосинтеза, и вновь образующиеся звезды уже имели в своем составе некоторое количество металлов. Таким образом считается, что звезды населения III не сохранились до наших дней. Из вещества, обогащенного взрывами первых звезд, формировалось новое поколение звезд — низкометаллические звезды населения II<sup>1</sup>. Звезды населения II уже содержали в своем составе достаточно тяжелых элементов для того, чтобы функция охлаждения газа определялась в основном металлами, и, как следствие, такие звезды могли иметь малые массы. Вероятно, часть звезд населения II могла образоваться в первых галактиках, а затем, в процессе иерархического слияния галактик, «кочевать» во все более крупные галактики. Возможность поиска таких звезд будет обсуждаться в следующем разделе.

## Ожидаемые наблюдательные проявления первых галактик и звезд

Как уже было отмечено во введении, многие проектируемые инструменты, возможно, позволят непосредственно наблюдать первые галактики и звезды.

Наблюдения газа в линии 21 см нейтрального водорода в близкой Вселенной являются одним из основных инструментов изучения галактик, поэтому наблюдения распределения газа на больших красных смещениях в линии 21 см, смещенной в метровый диапазон, позволит заглянуть в самую раннюю эволюцию Вселенной, в эпоху первых галактик. Для проведения подобных исследований в мире

---

<sup>1</sup> На самом деле, существует более тонкая классификация звездных населений, в частности, население II подразделяется на населения II.5 и II.0. Подробнее об этом можно прочитать в [10].

построены крупные радиотелескопы метрового диапазона: GMRT в Индии, MWA в Австралии, практически закончена сборка решетки LOFAR, расположившейся на территории нескольких европейских стран.

Для наблюдения первых звезд можно использовать факт того, что эти звезды были мощными источниками ультрафиолетового излучения, следовательно, можно ожидать, что их можно будет обнаружить по сильному излучению в рекомбинационных линиях  $\text{Ly}_\alpha$  и  $\text{HeII}$  1640 Å, смещенных из-за расширения Вселенной в инфракрасный диапазон. Отметим, что излучение с длиной волны меньше предела в 1215 Å испытывает значительное ослабление из-за поглощения фоновым нейтральным водородом — эффект Гана—Петерсона, а более длинноволновые кванты будут свободно распространяться в межгалактической среде. Таким образом, первые звезды можно обнаружить по мощному свечению в линиях  $\text{H}_\alpha$ ,  $\text{HeII}$  4686 Å.

Наряду с прямыми наблюдениями первых галактик возможен поиск их «следов» — звезд населения II.5, образовавшихся в первых галактиках и доживших до нашего времени (об этом мы уже упоминали в предыдущем разделе). Такие низкометаллические звезды образуются вслед за населением III и состоят из вещества, обогащенного первыми звездами. Следовательно, эти реликтовые звезды в своем составе содержат химический отпечаток эпохи первых звезд. В работе [16] показано, что такие звезды вполне могут быть обнаружены в ближайшем будущем. Изучение звезд населения II.5 позволит подтвердить или опровергнуть некоторые наши представления о первых звездах.

## **Наблюдения максимально удаленных галактик и низкометаллических звезд**

В данном разделе мы обсудим данные современных наблюдений галактик на больших красных смещениях. Как уже отмечалось, современные инструменты позволяют наблюдать чрезвычайно удаленные объекты. В последнее десятилетие найдено около 6 000 галактик на красных смещениях  $z$  от 3 до 6 ( $3 < z < 6$ ), что соответствует примерно 1—2 млрд лет после Большого взрыва [8].

Модернизация KTX, связанная с заменой устаревшей ИК-камеры NICMOS на современную WFC3/IR камеру, дала возможность достичь еще большей глубины наблюдений, что позволило открыть галактику UDFj-39546284 на  $z \approx 10.3$  (звездная величина  $28.92 \pm 0.18$ ).



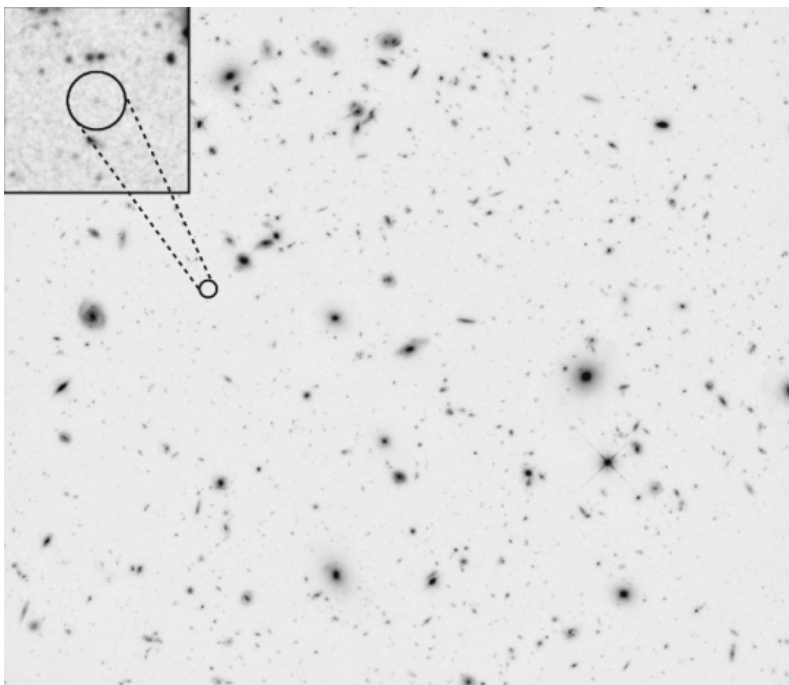


Рис. 3. Изображение участка неба, где была найдена галактика на  $z \sim 10$ . Маленькая точка в центре кружка и есть искомая галактика. Изображение получено на КТХ с использованием WFC3/IR-камеры (рисунок из [7])

На рис. 3 показан участок неба, снятый на космическом телескопе им. Хаббла с использованием камеры WFC3/IR, на котором находится эта экстремально далекая галактика. В центре круга — маленькая точка, это и есть галактика UDFj-39546284. Впрочем, наблюдения такого рода находятся на пределе современных возможностей, и, по оценкам самих авторов открытия [8], существует  $\sim 20\%$  вероятность того, что наблюдаемый объект является фиктивным.

Таким образом, к настоящему времени накопилось достаточно много наблюдений галактик на широком интервале красных смещений 0—10. Эта информация позволяет построить «глобальный» график эволюции скорости звездообразования и светимости во Вселенной на протяжении последних  $\sim 13$  млрд лет. Такой график пред-

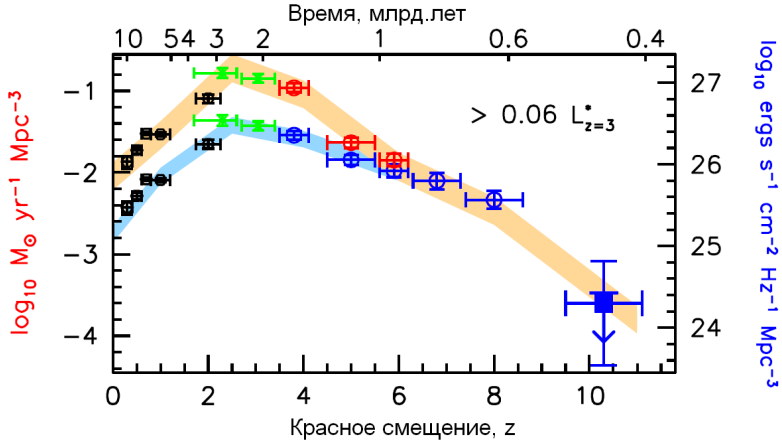


Рис. 4. Эволюция скорости звездообразования и светимости во Вселенной. Результаты получены на основе наблюдений галактик на различных красных смещениях  $0 < z < 10$  (рисунок из [8])

ставлен на рис. 4, из которого видно, что скорость звездообразования монотонно росла с  $z \sim 10$  до  $z \sim 4$ ; на  $z \sim 2-3$  наблюдается пик звездообразования, после чего начинается спад.

Наряду с первыми галактиками активно ведется и поиск звезд низкой металличности как «свидетелей» ранних стадий эволюции галактик. Поиску и изучению таких звезд (англ. *EMPS, Extremely Metal Poor Stars*) посвящены специальные программы на телескопах VLT («First Stars» programme), HET (CASH project), Keck (0Z project). К настоящему времени уже найдено несколько интересных объектов, это звезды в нашей Галактике, у которых металличность, определенная только по железу, составляет  $[Fe/H] \leq -5.0$  [13, 17, 18] и три звезды с металличностью  $[Fe/H] \leq -3.5$  в карликовых сфероидальных галактиках [19]. Такие значения металличностей уже близки к ожидаемым у населения II.5. Однако определять полную металличность звезд только по одному элементу нельзя, так как отношение обилий различных элементов в звездах не универсально и единственный элемент Fe не может служить достоверным индикатором металличности. В действительности все указанные звезды имеют избыток углерода, азота и кислорода [20], так что их полная металличность составляет  $\sim 10^{-2} Z_{\odot}$  [21].

В целом можно ожидать что в ближайшие десятилетия поиск и изучение первых галактик и звезд будет одной из наиболее активно развивающихся областей астрофизики.

## Список библиографических ссылок

1. *Peebles P. J. E.* Origin of the Angular Momentum of Galaxies // *Astrophys. J.* — 1969. — Vol. 155. — P. 393.
2. *Fall S. M., Efstathiou G.* Formation and rotation of disc galaxies with haloes // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1980. — Vol. 193. — P. 189.
3. *Partridge R. B., Peebles P. J. E.* Are Young Galaxies Visible? // *Astrophys. J.* — 1967. — Vol. 147. — P. 868.
4. *Bromm V., Yoshida N.* The First Galaxies // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 49. — P. 373–407. 1102.4638.
5. *Johnson J. L.* Formation of the First Galaxies: Theory and Simulations // *ArXiv e-prints.* — 2011. 1105.5701.
6. *Springel V., White S. D. M., Jenkins A. et al.* Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars // *Nature.* — 2005. — Vol. 435. — P. 629–636. [arXiv:astro-ph/0504097](#).
7. *Reddy N. A.* Cosmology: A glimpse of the first galaxies // *Nature.* — 2011. — Vol. 469. — P. 479–481. 1102.1017.
8. *Bouwens R. J., Illingworth G. D., Labbe I. et al.* A candidate redshift  $z \sim 10$  galaxy and rapid changes in that population at an age of 500Myr // *Nature.* — 2011. — Vol. 469. — P. 504–507. 0912.4263.
9. *Press W. H., Schechter P.* Formation of Galaxies and Clusters of Galaxies by Self-Similar Gravitational Condensation // *Astrophys. J.* — 1974. — Vol. 187. — P. 425–438.
10. *Шустов Б. М.* Первые звезды // *Физика космоса : Тр. 40-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 31 янв. — 4 февр. 2011 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2011. — С. 241–259.*
11. *Горбунов Д. С., Рубаков В. А.* Введение в теорию ранней Вселенной. — М. : Физматлит, 2006.
12. *Pospelov M., Pradler J., Steffen F.* Constraints on supersymmetric models from catalytic primordial nucleosynthesis of beryllium // *J. Cosmolog. Astropartic Phys.* — 2008. — Vol. 11. — P. 20.
13. *Christlieb N., Bessell M. S., Beers T. C. et al.* A stellar relic from the early Milky Way // *Nature.* — 2002. — Vol. 419. — P. 904–906. [arXiv:astro-ph/0211274](#).

14. *Copi C. J., Schramm D. N., Turner M. S.* Big-Bang Nucleosynthesis and a New Approach to Galactic Chemical Evolution // *Cosmic Abundances* / Ed. by S. S. Holt & G. Sonneborn : Astronom. Soc. Pacific Confer. Seri. — 1996. — Vol. 99.
15. *Omukai K., Palla F.* On the Formation of Massive Primordial Stars // *Astrophys. J., Lett.* — 2001. — Vol. 561. — P. L55—L58.
16. *Кабанов А. А., Шустов Б.* Влияние звезд населения III на раннюю эволюцию галактик // *Астрон. журн.* — 2011. — Т. 88, № 9. — С. 852—861.
17. *Frebel A., Aoki W., Christlieb N. et al.* Nucleosynthetic signatures of the first stars // *Nature.* — 2005. — Vol. 434. — P. 871—873. [arXiv:astro-ph/0503021](#).
18. *Norris J. E., Christlieb N., Korn A. J. et al.* HE 0557-4840: Ultra-Metal-Poor and Carbon-Rich // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 670. — P. 774—788. 0707.2657.
19. *Tafelmeyer M., Jablonka P., Hill V. et al.* Extremely metal-poor stars in classical dwarf spheroidal galaxies: Fornax, Sculptor, and Sextans // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 524. — P. A58. 1008.3721.
20. *Collet R., Asplund M., Trampedach R.* The Chemical Compositions of the Extreme Halo Stars HE 0107-5240 and HE 1327-2326 Inferred from Three-dimensional Hydrodynamical Model Atmospheres // *Astrophys. J., Lett.* — 2006. — Vol. 644. — P. L121—L124. [arXiv:astro-ph/0605219](#).
21. *Bonifacio P.* The first galactic stars and chemical enrichment in the halo // *IAU Symp.* / Ed. by K. Cunha, M. Spite, & B. Barbuy : IAU Symp. — 2010. — Vol. 265. — P. 81—89. 1002.1452.

# Тезисы студенческих докладов

С. А. Алексеева<sup>1</sup>, С. Ю. Парфенов<sup>1</sup>,  
А. М. Соболев<sup>2</sup>, М. В. Юшкин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет

<sup>2</sup>Астрономическая обсерватория УрФУ

<sup>3</sup>Специальная астрофизическая обсерватория

## ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЗВЕЗДЫ HD 37737 В АССОЦИИ OB1 AUR

На сегодняшний день вопрос о происхождении спектральной двойной звезды HD 37737, ионизирующей туманность S232, остается спорным. Некоторые исследователи считают, что она родилась в ассоциации OB1 Aur, однако скорость ее центра масс ( $> 30$  км/с) свидетельствует о том, что эта звезда, возможно, пришла в данную область извне. В настоящей работе проводилось сравнение химсостава звезды HD 37737 с двумя другими звездами ассоциации OB1 Aur. Используя спектры высокого разрешения в синей области (4100–5450 Å), полученные на НЭС БТА в ноябре 2009 г. и октябре 2007 г., был исследован химсостав трех OB-звезд: HD 37737, IRAS05364+3552, BD+35°1201, принадлежащих ассоциации OB1 Aur. Относительное содержание He оценивалось с учетом эффектов отклонения от ЛТР. Обилия других элементов (Mg, Si, O, C, N, S, Al) оценены в рамках ЛТР. Как правило, учет не-ЛТР эффектов приводит к уменьшению содержания элементов, поэтому ЛТР величины, возможно, переоценены. Для HD 37737 подозревается избыток гелия относительно двух других звезд и относительно солнечного содержания, что характерно для звезд, входящих в двойные системы. Содержания остальных элементов во всех звездах проявляют одинаковые особенности. На основании этого сделан вывод о том, что все три звезды родились в областях с одинаковым химсоставом.

Работа частично поддержана РФФИ 11-02-97124-р\_поволжье\_а.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР В ГАЗОПЫЛЕВОЙ МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЕ**

Исследуется вопрос о том, в какой степени космическую пыль можно считать трассером особенностей течений межзвездного газа. В работе проводится анализ когерентных структур, наблюдаемых в численных двумерных гидродинамических расчетах течения турбулентной межзвездной среды. Целью работы являются: 1) выявление когерентных структур в пылевой компоненте, 2) определение зависимости между размерами пылевых частиц и характеристиками когерентных структур, 3) анализ пространственных корреляций между распределением пыли и газа.

Движение газа рассчитывается путем численного интегрирования системы гидродинамических уравнений. Пыль рассматривается как пассивная скалярная полидисперсная примесь, ее движение рассчитывается методом N-body. Для разделения поля скоростей на когерентную и некогерентную компоненты используется вейвлет-преобразование [1]. Расчеты показывают, что пылинки имеют тенденцию покидать области повышенной завихренности тем активнее, чем пылинки крупнее, что приводит к пространственной сегрегации пылинок по размерам, однако длина когерентности для когерентной составляющей пылевой компоненты остается достаточно большой и сравнимой с размерами наибольших вихрей, что означает, что зависимость размера когерентной структуры от размера пылинки малосущественна. Доля когерентной компоненты в общем количестве пылевых частиц составляет от единиц до десятков процентов в зависимости от генерируемого типа турбулентности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 11-02-97124-р\_поволжье\_a.

### **Список библиографических ссылок**

1. *Ruppert-Felsot J. E., Praud O., Sharon E., Swinney H. L.* Extraction of coherent structures in a rotating turbulent flow experiment // Phys. Rev. Lett. — 2005. — Vol. 72. — P. 01631.

## РАЗРАБОТКА ПРИКЛАДНОЙ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ АСТЕРОИДОВ

В данной работе описывается разрабатываемая нами прикладная программная система для визуализации вероятностной орбитальной эволюции астероидов. Особенностью системы является возможность одновременно демонстрировать движение не только изучаемого объекта, но и близких к нему тестовых частиц.

Начальными данными для системы являются координаты астероида и тестовых частиц, которые вычисляются с помощью специально разработанного программного обеспечения [1]. Координаты больших планет определяются на основе эфемерид DE405.

В качестве среды разработки выбрана среда объектно-ориентированного программирования Delphi. Визуализация и вывод объектов производится при помощи встроенной в язык Delphi библиотеки OpenGL. Эту библиотеку поддерживает большинство операционных систем, что позволяет в будущем сделать программу кроссплатформенной. В настоящее время создана первая версия системы, в которой реализованы следующие функции:

- визуализация движения астероида и тестовых частиц;
- масштабирование, изменение точки наблюдения, а также поворот системы координат непосредственно во время демонстрации движения;
- изменение скорости анимации и переход на заданную пользователем дату.

### Список библиографических ссылок

1. Быхова Л. Е., Галушина Т. Ю. Алгоритмическое и программное обеспечение решения задач динамики астероидов, сближающихся с Землей, в среде параллельного программирования // Изв. вузов. Физика. — 2009. — Т. 52, вып. 10/2. — С. 12—19.

## **КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ ОТОБРАЖЕНИЯ НА ЗАДАННЫЙ МОМЕНТ ВРЕМЕНИ ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ**

В данной работе рассматривается комбинированный способ отображения во времени начальных доверительных областей движения малых тел Солнечной системы. На первом этапе данного способа применяется линейное отображение начальной области с последующей его оценкой на нелинейность. Если показатель нелинейности для отображенной области оказывается меньше некоторого порогового значения, то область определена правильно. В случае если показатель нелинейности больше порогового значения, линейное отображение осуществляется на более близкий момент времени, где показатель нелинейности меньше этого значения. Отображенная область на данный момент времени используется в дальнейшем как стартовая для нелинейных отображений.

В качестве объектов исследования было выбрано несколько потенциально опасных астероидов, имеющих различные степени нелинейности задачи оценивания. Для каждого из этих объектов мы определяли область применения линейного метода отображения во времени начальных доверительных областей движения.

Проведенное нами исследование позволяет сделать вывод, что применение комбинированного способа отображения во времени позволяет сократить вычислительные затраты, так как трудоемкое нелинейное отображение необходимо применять на меньшем интервале времени.



## ТЕХНИКА ПРЕЦИЗИОННОЙ ПЗС-ФОТОМЕТРИИ НА ТЕЛЕСКОПЕ МАСТЕР-II-УРАЛ КОУРОВСКОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ

В работе представлена техника наблюдения и фотометрической обработки транзитов экзопланет на телескопе МАСТЕР-II-Урал.

Явления прохождения экзопланет по диску родительских звезд (транзиты) позволяют оценить радиусы и наклон орбит экзопланет, а также обнаружить другие возмущающие тела в системе (другие экзопланеты, экзолуны). Для этого необходимо проводить фотометрию с максимально возможной точностью.

Автором работы проведены наблюдения ряда транзитов экзопланет и разработана техника обработки результатов наблюдений для получения максимальной точности фотометрии.

Использование обеих труб телескопа позволило проводить синхронные независимые наблюдения транзита в двух фильтрах.

Фотометрия проводилась в программном пакете IRAF/apphot.

Постобработка (исправление данных за изменение прозрачности атмосферы) производилась в программе, разработанной инженером Коуровской астрономической обсерватории В. В. Крушинским.

Автором работы были внесены усовершенствования в код программы для улучшения оценки ошибок фотометрии и упрощения процесса обработки исходных данных, а также для перехода от инструментальных звездных величин к стандартным. Наилучшая точность фотометрии составила  $0.005^m$ .

Полученные данные были приняты в международную базу данных транзитов экзопланет ETD (Exoplanet Transit Database).

**В. В. Вильянен, И. В. Колбасина, Е. Д. Старовойт,  
С. А. Ходенков, С. А. Веселков, Е. Г. Лапухин**  
Сибирский государственный аэрокосмический университет  
им. М. Ф. Решетнева

## **АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ФИЗИЧЕСКОГО ПРАКТИКУМА В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММАХ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ**

В СибГАУ в общефизическом и измерительном практикуме для направлений «Физика» и «Космические технологии» введена и прошла успешную апробацию серия лабораторных работ с астрофизической тематикой.

Студенты изучают основы спектрального анализа, используя спектры поглощения атома водорода серии Бальмера, осуществляют классификацию звезд спектральных классов В, А, F и Т, делают оценки температур звезд, их масс и светимостей. В обсерватории СибГАУ студенты имеют возможность собственноручно проводить наблюдения и на полученных ПЗС-снимках изучать переменные звезды, проводить их фотометрию и по совокупности фотометрических данных определять период изменения блеска звезд.

Представленная серия лабораторных работ основана на современном методе астрометрических и фотометрических наблюдений. Для их выполнения используется оригинальный наблюдательный материал, полученный непосредственно в обсерватории СибГАУ. Спектральные данные инфракрасного и радиочастотного диапазонов, полученные в результате астрофизических исследований, включая орбитальные оптические инструменты, есть в Интернете, например на сайте <http://nedwww.ipac.caltech.edu>. Для выполнения лабораторных работ студенты используют программное обеспечение MaxIm DL, Izmccd, Find Orb 32, StarCalc, WinEfk, интернет-ресурсы; работают с различными базами данных. Выполнение лабораторных работ с астрофизической тематикой пробуждает интерес к науке и новым исследованиям.

**КАТАЛОГИ ВИЗУАЛЬНЫХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД:  
КОРРЕЛЯЦИЯ, ЭФФЕКТЫ СЕЛЕКЦИИ,  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИСТЕМ  
ПО НАБЛЮДАТЕЛЬНЫМ ПАРАМЕТРАМ**

Исследование физических свойств двойных звезд различных типов может дать неоценимую информацию об образовании и эволюции звезд. Однако, чтобы получить корректные распределения двойных звезд по различным параметрам, требуется учитывать многочисленные эффекты селекции. При анализе нескольких (в особенности компилятивных) каталогов необходимо также принимать во внимание степень независимости представленных в них данных.

В работе было исследовано три самых представительных каталога визуальных двойных (WDS, CCDM и TDSC) и проведено кросс-отождествление включенных в них систем. Наряду с высокой степенью зависимости данных, представленных в первых двух каталогах, обнаружено множество ошибочных и неточных отождествлений. Предприняты шаги к созданию единого сводного каталога визуальных двойных звезд.

Были получены, поправлены за эффекты селекции и интерпретированы распределения каталогизированных систем по важнейшим наблюдательным параметрам — координатам и блеску, а также угловому расстоянию и разнице блесков компонентов. Предложены возможные объяснения для рассогласования некоторых результирующих распределений (в частности, звезд каталога TDSC со звездами двух других каталогов). Данные распределения могут быть использованы для получения фундаментальных распределений и истории звездообразования двойных/кратных систем и их компонентов.

**Е. В. Карукес**  
Южный федеральный университет

## **ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗВЕЗД ПО МЕТАЛЛИЧНОСТИ**

В работе рассматривается проблема F—G карликов в окрестности Солнца. В окрестности Солнца G карликов с малым содержанием металлов больше, чем G карликов с большой металличностью. Это не согласуется с теорией.

Есть несколько точек зрения относительно этого парадокса, связанных с химической эволюцией нашей галактики. Мы рассматривали две модели химической эволюции нашей Галактики.

1. Предполагается два эпизода аккреции: во время первого за короткое время сформировались гало и балдж, а во время второго — тонкий диск, формирование которого происходило постепенно, от центра к краю.
2. Предполагается единичный эпизод аккреции.

**А. С. Курушина**  
Волгоградский государственный университет

## **НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНЫХ ЗВЕЗДНЫХ ДИСКОВ НА ОСНОВЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ CUDA**

Построены численные модели N-тел для изучения динамики звездных дисков спиральных галактик с использованием параллельных технологий CUDA. Исследована эффективность построенных программных комплексов. Изучены особенности динамики возмущений плотности в звездном диске при различных условиях.

## **НЕСТАЦИОНАРНАЯ ДИСКОВАЯ АККРЕЦИЯ В РЕНТГЕНОВСКИХ НОВЫХ**

Рентгеновские новые — транзистентные объекты, возникающие в двойных системах благодаря нестационарной аккреции на нейтронную звезду или черную дыру. Большую часть времени аккреционный диск является холодным, однако, приобретая определенную массу, он разогревается, водород в нем ионизируется, темп аккреции и рентгеновская светимость резко возрастают. На рентгеновской кривой блеска наблюдается резкий рост светимости, после которого наступает ее пологий спад. Но спустя примерно 30—70 дней на внешнем краю аккреционного диска возникает зона с неполной ионизацией водорода. В этой зоне появляется конвекция в направлении, перпендикулярном радиусу диска, которая эффективно увеличивает вязкость и темп аккреции, на кривой блеска образуется вторичный пик. Характер спада кривой блеска изменяется.

Рентгеновское излучение, исходящее от внутренних частей аккреционного диска, нагревает внешние его части, повышая их эффективную температуру. Этот эффект вносит изменения в видимую часть спектра аккреционного диска. Следовательно, правильный учёт рентгеновского облучения важен при моделировании оптических кривых блеска рентгеновских новых.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЛАСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЛИНИИ $\text{HeII } 4686 \text{ \AA}$ В СИСТЕМЕ SS 433

Вопрос о массах компонент в системе SS 433 не разрешен. Орбитальное движение релятивистской звезды может быть измерено по эмиссионной линии  $\text{HeII } 4686 \text{ \AA}$ , которая формируется в ветре сверхкритического диска и имеет сложный многокомпонентный профиль. Движение звезды-донора может быть измерено по слабым линиям поглощения, но они также формируются в околозвездном газе.

Мы строим модель ветра сверхкритического диска, которая учитывает затмения в системе и непрозрачность ветра. Это стало возможно в связи с появлением высококачественных спектров, полученных на 6-м телескопе БТА (2003–2007) и 8-м телескопах Subaru и Gemini (2007, 2006), которые мы используем в работе. Если модель сможет объяснить основные элементы многокомпонентного профиля линии  $\text{HeII } 4686 \text{ \AA}$ , появится возможность выделить часть линии, которая наиболее точно отражает движение центральной звезды, и только после этого получить надежную оценку значения массы.

Для построения модели мы используем формализм Шакуры—Сюняева, согласно которому под радиусом сферизации начинается истечение ветра такое, что реализуется локально эддингтоновская светимость. В работе мы рассматриваем различные модели газовой динамики ветра: случай, когда газ, доходящий до радиуса сферизации, перемешивается и его параметры могут быть найдены из усреднения полного импульса истекающего вещества по времени, а также модель одночастичного приближения вылетающих частиц газа. Мы используем статистические методы построения профиля на основе метода Монте-Карло, смысл которого заключается в том, чтобы рассматривать конфигурацию газа как реализацию случайного распределения с заданной плотностью вероятности. Наша модель ветра и профиля линии  $\text{HeII } 4686 \text{ \AA}$  достаточно приближена, но, несмотря на это, она объясняет основные компоненты профиля линии и основные закономерности.

## ДВИЖЕНИЕ ЗВЕЗД В ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ С КОНСЕРВАТИВНЫМ ОБМЕНОМ МАСС

В течение полувека для определения относительной орбиты тесных двойных звездных систем использовалась некорректная модель Пачинского—Хуанга. По сей день в работах, связанных с тесными двойными системами, эта модель продолжает использоваться.

Для определения относительного движения звезд в тесной двойной системе в настоящей работе используется численное интегрирование уравнений движения с учетом реактивных сил притяжения звезд перетекающей струей. Проведенные вычисления эллиптических орбит тесных двойных звезд показывают, что влияние реактивной силы на эволюцию орбиты звезд может быть различным.

Так же была найдена зависимость траектории струи при изменении угла наклона начальной скорости ( $\alpha = 0, 20, 40, 60, -20, -40, -60, 80^\circ$ ); при изменении величины начальной скорости  $V_o = \beta V V_1(v)$ , ( $\beta = 1, 0.5, 1.5, 2$ ).

Определены изменения большой полуоси и эксцентриситета относительной орбиты S2 при новом условии: учитывается только составляющая реактивной силы, направленной в центр масс звезды S2.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРБИТЫ ВИЗУАЛЬНО-ДВОЙНОЙ ЗВЕЗДЫ ADS 9031 РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

Представленная работа посвящена изучению движения визуально-двойной звезды ADS 9031. Автором была обработана выборка фотопластинок стеклянной библиотеки ГАО РАН (Пулковской обсерватории), полученных на 26-дюймовом рефракторе с 1962 по 1996 г. Для 142 пластинок для исследуемой звезды был совершен частичный отбор пластинок в нескольких эпохах с хорошим качеством. Обработка включала оцифровку изображения с последующим измерением относительных положений компонент (использовалась программа IZMCCD И. С. Измайлова). После исключения систематических смещений методом параметров видимого движения (ПВД) (автор А. А. Киселев, реализация О. В. Кияевой) по разным дугам были определены орбитальные параметры системы. Период двойной равен  $T = 159$  лет, эксцентриситет орбиты  $e = 0.46$ . Используя удаленные эпохи наблюдений, оценены значения суммы масс компонентов  $M_{ab} = 2.2M_{\odot}$ , относительная лучевая скорость  $\Delta Vr = 3.2$  км/с, параллакс взят из каталога Гиппаркос  $\pi = 0.07458''$ . Кроме того, для сравнения орбита пары ADS 9031 была определена еще двумя методами: методом определения эллиптической орбиты двойной звезды по ее проекции на небесную сферу (реализация О. В. Кияевой) и методом дифференциальных поправок (реализация А. А. Токовина).

В результате проделанной работы были освоены различные методы построения орбит, оцифрована часть архива стеклянной библиотеки ГАО РАН и несколькими методами определена орбита визуально-двойной звезды ADS 9031.



С. Ю. Парфенов<sup>1</sup>, С. А. Алексеева<sup>1</sup>, А. М. Соболев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет

<sup>2</sup>Астрономическая обсерватория УрФУ

## ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГОРЯЧИХ ЗВЕЗД ПО КРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

В молодых звездных скоплениях, погруженных в родительские молекулярные облака, из-за сильного поглощения затруднительно получить спектры звезд в синей области, для которой разработаны традиционные методы оценки параметров. Цели данной работы — определить параметры молодых ОБ-звезд IRAS05364+3552 и BD+35°1201 и оценить, насколько точны оценки параметров звезд, основанные только на красной области спектра.

В работе использовались спектры высокого разрешения в синей (4000—5450 Å) и красной (5200—6700 Å) областях, полученные на НЭС БТА в октябре 2007 г. и ноябре 2009 г. Для определения параметров в синей области использовались линии He, крылья линий H, в красной области — линии He, крылья H $\alpha$ , линии Si и O. По данному набору линий путем визуального сравнения синтетических спектров со спектрами, полученными при наблюдениях, определялись эффективная температура  $T_{eff}$ , ускорение свободного падения  $\log g$  и проекция скорости вращения  $v_r \sin i$ . Синтетические спектры были рассчитаны программой SYNSPEC с использованием моделей атмосфер, полученных с помощью программы TLUSTY (Lanz & Hubeny, 2002).

В результате получено, что параметры, определенные независимо по линиям в синей и красной областях спектра, отличаются несущественно. Максимальное отличие в значениях  $T_{eff}$  составляет 350 K, в значениях  $\log g$  — 0.08 dex. Таким образом, для молодых звезд со спектральными классами O9.5 V и B0 V показано, что по спектру в красной области можно достаточно точно оценить основные параметры звезды.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-02-00589а.

## **АНАЛОГ ДЕЛЕНИЯ КАССИНИ, НАБЛЮДАЕМОГО В ДИСКЕ ГАЛАКТИКИ ПО РАДИОЛИНИИ 21 см**

В настоящей работе речь идет о структуре, которая представляет собой область пониженного содержания атомарного водорода. Форма ее — кольцо, расположенное в плоскости галактического диска, центр которого совпадает с центром галактики. В нашей Галактике Млечный Путь — это кольцо, локализованное немного дальше от галактического центра, нежели нынешнее положение Солнца. Внешне оно напоминает знаменитое деление Кассини в кольце Сатурна. По этой причине мы и называем его «галактическим делением Кассини». С целью установления существования и морфологии структуры с дефицитом газа в нашей Галактике в настоящей работе будут проанализированы новые данные по радиоизлучению нейтрального водорода в линии 21 см.

**А. Ф. Пунанова<sup>1</sup>, В. В. Крушинский<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет

<sup>2</sup>Астрономическая обсерватория УрФУ

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТОВОЛОКОННОГО ЭШЕЛЛЕ-СПЕКТРОГРАФА 1.2-м ТЕЛЕСКОПА КОУРОВСКОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ**

В работе представлено исследование системы 1.2-м телескоп — оптоволоконный эшелле-спектрограф высокого разрешения Коуровской астрономической обсерватории. Система предполагает два варианта наблюдений с разным диапазоном длин волн: 4 170—7 900 и 4 800—10 870 Å. Исследование проводилось для диапазона 4 170—7 900 Å.

Построен атлас спектра калибровочной ThAg лампы полого катода. Определена аппаратная функция для разных областей эшелле-кадра. На краях кадра заметно влияние дисторсии объектива камеры, оно учитывается при построении дисперсионной кривой. Получены оценки точности измерения лучевых скоростей и уровня рассеянного света.

Исследованы сдвиги шкалы длин волн в зависимости от высоты и азимута спектрографа.

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ДВИЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ

В рамках астероидно-кометной опасности важными задачами являются получение точных положений опасных объектов и высокоточное моделирование их движения. Расчет разностей ( $O-C$ ) — эффективный метод оценки точности наблюдений. Разности ( $O-C$ ) минимальны в случае согласованности наблюдений и используемой при вычислениях модели сил. Для получения оценки исследовалось влияние на ( $O-C$ ) как наблюдений, так и моделей сил, используемых при расчетах. Цель данной работы — исследование ( $O-C$ ), полученных с помощью традиционно используемого в астрономической обсерватории УрФУ программного комплекса IZMCCD и комплекса программ, разработанного в НИИ ПММ ТГУ.

Результаты обработки наблюдений для 16 астероидов, наблюдаемых на телескопе СБГ в АО УрФУ, показали преимущество программ НИИ ПММ ТГУ перед IZMCCD. Благодаря возможности варьирования модели сил в комплексе НИИ ПММ ТГУ удалось снизить среднеквадратическую ошибку разностей ( $O-C$ ) в среднем на  $0.1-0.2''$ , что говорит о лучшей согласованности модели с наблюдениями. Для объективной оценки из каталогов MPC выбирались наблюдения исследуемых объектов, выполненные с поверхности Земли с 2000 по 2010 г., и обрабатывались теми же программными средствами. Оценивалось влияние релятивистских эффектов от Солнца на представление наблюдений. Результаты показали необходимость учета релятивистских эффектов для некоторых объектов. Кроме того, было исследовано влияние Коуровских наблюдений на поведение среднеквадратической ошибки при обработке всех наблюдений с поверхности Земли. Результаты показали, что наблюдения, проведенные в АО УрФУ, удовлетворяют современным требованиям по точности.

К. И. Смирнова<sup>1</sup>, А. В. Моисеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет

<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН

## НОВЫЙ КАТАЛОГ ГАЛАКТИК С ПОЛЯРНЫМИ КОЛЬЦАМИ

Галактики с полярным кольцом (ГПК) — это галактики, в которых наблюдается вращение относительно двух осей: звездный диск материнской галактики вращается относительно видимой малой оси, а в почти перпендикулярной к нему плоскости наблюдается вращение протяженной звездно-газовой структуры, называемой полярным кольцом. По современным представлениям, такие структуры могли образоваться в результате аккреции вещества с галактики-спутника или из газового филамента межгалактической среды либо же после центрального столкновения двух перпендикулярно ориентированных дисковых галактик. На настоящий момент свойства галактик с полярными кольцами изучены мало, критерии классификации разработаны слабо. Нами проведена работа по составлению каталога кандидатов в ГПК с целью поиска ранее неизвестных ГПК и проведения статистических исследований их свойств. Работа проводилась на основе каталога SDSS. Обработка каталога по выбранным критериям (отбор по полной выборке GalaxyZoo, наличие ортогонально вращающихся плоскостей и фотометрически подходящих размеров, т. е. должна быть возможность разделить кольцо и материнскую галактику) позволила выделить 231 галактику-кандидат в ГПК, из которых ранее как ГПК были известны только пять объектов. Наблюдения, проведенные в 2010—2011 гг. на 6-м телескопе САО РАН, позволили кинематически подтвердить еще восемь галактик из нашего каталога. У трех галактик возможно наличие кольца, а у одной, вероятно, наблюдается процесс формирования полярного кольца.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 09—02—00870.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЛОКАЛЬНОЙ ГЕОДИНАМИКИ ПО ДАННЫМ ГЛОНАСС/GPS ИЗМЕРЕНИЙ

В работе излагаются полученные методами математического моделирования результаты исследования вероятностного алгоритма решения задач локальной геодинамики с использованием ГЛОНАСС/GPS наблюдений. Анализируется статистический алгоритм выявления тренда в координатах расположенного в зоне подвижки земной коры пункта, оснащенного ГЛОНАСС/GPS приемником.

Предполагается, что вектор положения  $\mathbf{q} = \{x, y, z\}$  пункта определяется по ГЛОНАСС/GPS измерениям методом наименьших квадратов (НК). Наличие тренда в координатах пункта выявляется по смещению доверительной области, в которой находится решение.

Классический способ задания доверительной области в виде  $\mathbf{q}^i = A\boldsymbol{\eta}^i + \hat{\mathbf{q}} (i = 1, \dots, N)$ , где  $\boldsymbol{\eta}^i$  — 6-мерный вектор случайных чисел, распределенных по нормальному закону;  $N$  — число рассматриваемых решений;  $A$  — треугольная матрица такая, что  $A^T A = D$ , где  $D$  — ковариационная матрица, заменяется более экономичным способом, в котором доверительная область определяется ее границей. Этого, как будет показано в докладе, вполне достаточно для выявления тренда в координатах рассматриваемого пункта.

Для множества случайных точек  $\mathbf{q}^i$  из вероятностной области, определенной НК решением, может быть найдено значение  $gamma_i = (\mathbf{q}^i - \hat{\mathbf{q}})^T Q (\mathbf{q}^i - \hat{\mathbf{q}})$ . Только те из значений  $\gamma_i$ , которые удовлетворяют соотношению  $\gamma^* = t\sigma_0^2 F^*$ , определяют граничную поверхность доверительной области. Причем  $Q = R^T R$ , где  $R$  — матрица частных производных от наблюдаемых параметров по оцениваемым;  $F^*$  — верхняя квантиль функции Фишера, вычисляемая по количеству наблюдений, числу определяемых параметров  $m$  и заданной вероятности  $P$ ;  $\sigma_0$  — среднеквадратическая ошибка единицы веса. С помощью коэффициентов  $l_i = \gamma^*/\gamma_i$ , растягивающих вектор  $(\mathbf{q}^i - \hat{\mathbf{q}})$  до граничной поверхности  $\gamma^*$ , определяется вектор  $\bar{\mathbf{q}}^i$ :  $(\bar{\mathbf{q}}^i - \hat{\mathbf{q}}) = l_i(\mathbf{q}^i - \hat{\mathbf{q}})$ , который и задает пространственную границу доверительной области.

**Е. Д. Старовойт, И. В. Колбасина, В. В. Вильянен,  
С. А. Веселков, Е. Г. Лапухин**  
Сибирский государственный аэрокосмический университет  
им. М. Ф. Решетнева

## **НОВЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ В СОЗВЕЗДИИ LACERTA**

Одно из главных направлений обсерватории СибГАУ — поиск и исследование переменных звезд. Учебная обсерватория СибГАУ, расположенная в черте города Красноярска, существует около трех лет. За прошедший год было выявлено более 80 новых переменных звезд в созвездиях Кассиопеи, Большой Медведицы и Ящерицы.

В данной работе представлены новые переменные звезды, открытые в созвездии Ящерицы.

Наблюдения проводились на инструменте диаметром 400 мм, 1/2.3 + CCD FLI ML9000. Размер исследуемой площадки составляет 2.3 x 2.3 градуса. В интегральном свете получено достаточное количество наблюдательного материала для поиска новых переменных звезд и их классификации.

На исследуемом участке выявлено более ста кандидатов в переменные звезды. На начало ноября тринадцать из них исследовано. Это затменно-переменные звезды типа EA, EB и EW. Для них определены периоды, максимумы и минимумы изменения блеска, начальные эпохи и типы переменности.

Поиск новых переменных звезд осуществлялся в пакете Muniwin. Фотометрия проводилась в программе MaxIm DL. В программе Winefk построены кривые блеска переменных звезд и определены периоды.

**А. Р. Титаренко<sup>1</sup>, Е. А. Семенко<sup>2</sup>, Т. А. Рябчикова<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова

<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН

<sup>3</sup>Институт астрономии РАН

## **ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И СТРАТИФИКАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В АТМОСФЕРЕ АР-ЗВЕЗДЫ HD8441**

Исследование химического состава звезды было проведено по спектрам, полученным на обсерватории Пик Терскол, в области от 3 700 до 7 550 Å с разрешением 40 000.

По наблюдаемым индексам женевской и стремгеновской фотометрических систем были определены начальные параметры атмосферы, которые уточнялись по наблюдаемым профилям водородных линий.

В результате по химическому составу были приняты следующие параметры: температура 1930 К, логарифм ускорения свободного падения 3.4, микротурбулентная скорость 0.3 км/с. С ними была рассчитана атмосфера по программе Куруца ATLAS9. Отождествление линий в спектре проводилось сравнением полученного и синтетического спектров, теоретически рассчитанного по данной атмосфере. Атомные данные для расчета взяты из базы данных VALD.

По измеренным эквивалентным ширинам примерно 850 неblendированных линий было получено содержание для 18 химических элементов (от натрия до европия).

Большой разброс в содержаниях, полученных по индивидуальным линиям, заставил предположить существование вертикальных различий химического состава атмосферы звезды.

В связи с этим был проведен стратификационный анализ железа, хрома, кальция и марганца. В результате получена закономерность, такая что элементы концентрируются в глубоких слоях атмосферы — в околофотосферных слоях.



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ МАСС ЗВЕЗД С ПОМОЩЬЮ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ

Определение начальной функции масс (НФМ) звезд — одна из фундаментальных проблем астрономии. В настоящее время опубликовано несколько НФМ, показывающих иногда существенные различия, особенно в области малых масс. В работе предлагается методика проверки НФМ, опирающаяся на распределения различных параметров двойных систем: отношение масс, разница блесков компонентов двойных, которые определить из наблюдений значительно проще, чем индивидуальные массы. Автор моделирует ансамбль двойных систем, делая различные предположения об истории звездообразования (в частности, о форме НФМ). Результаты моделирования сравниваются с наблюдениями.

Для решения этой задачи была написана программа, имитирующая ансамбль двойных систем. В ней задаются различные начальные распределения, учитывается звездная эволюция, рассчитываются наблюдаемые параметры двойных систем, учитываются эффекты селекции и строятся распределения систем по интересующим параметрам. Кроме того, был проведен обзор публикаций для выбора наблюдаемых распределений для сравнения с результатами моделирования. В работе приведено сравнение модельных и наблюдаемых распределений и на основании значений критерия согласования Пирсона сделаны выводы о применимости наиболее популярных теоретических НФМ и различных подходов к заданию истории звездообразования.

## **ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПОПРАВК В ЗАДАЧАХ УЛУЧШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТ**

В работе рассматриваются особенности свойств (скорость и область сходимости) метода дифференциальных поправок в задачах улучшения параметров орбит в фазовом пространстве декартовых и кеплеровых переменных. В качестве объектов исследования было выбрано несколько потенциально опасных астероидов, наблюдавшихся на различных интервалах времени. В ходе проведенного численного эксперимента сделаны следующие выводы:

1. Свойства метода дифференциальных поправок зависят от интервала наблюдаемости объектов и выбора системы фазовых переменных.
2. В случае наблюдаемости объектов в одной оппозиции лучшей системой координат при решении задач улучшения является декартова СК.
3. При наблюдаемости в нескольких оппозициях выбор СК неоднозначен. Возможны варианты, когда выбор кеплеровой СК предпочтительней (объект 2007AE12) и наоборот (объект 2006WQ29).

**ДИНАМИКА ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ  
В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОТЕНЦИАЛЕ  
НЕСТАБИЛЬНОЙ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ**

В работе рассматривается влияние распада темной материи на кинематику шаровых скоплений в галактике. Моделируется поведение шарового скопления в гравитационном потенциале, создаваемом сферическим и эллипсоидальным распределением неустойчивой темной материи. Время распада принято в пределах от 19 до 100 млрд лет. Численное моделирование показало, что старые шаровые скопления с вытянутыми орбитами (малым угловым моментом) могут изменять направление вращения вокруг центра галактики (изменять знак углового момента) на космологических временах под действием внешнего малого возмущения со стороны Большого и Малого Магеллановых Облаков. В результате эти шаровые скопления могут наблюдаться как скопления с ретроградным вращением.

# Тезисы кратких сообщений

В. В. Акимкин  
Институт астрономии РАН

## ДИАГНОСТИКА РАННИХ ФАЗ ЭВОЛЮЦИИ ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКОВ

Ежегодное количество публикаций с ключевыми словами «протопланетный диск» увеличилось в 11 раз за последние 16 лет (с момента открытия первой планеты у звезды солнечного типа). Этот всплеск объясняется как ростом наблюдательных возможностей, так и важностью проблемы: изучение физики протопланетных дисков позволяет понять происхождение и эволюцию планетных систем, включая Солнечную. Развитие наблюдательных методик (интерферометрия в ближнем ИК-диапазоне, прямые изображения в видимой области спектра) и успешная работа космических телескопов (ISO, Spitzer, Herschel) и наземных (суб-)миллиметровых инструментов (JCMT, SMA, IRAM, ATCA) позволили детально исследовать свойства пыли и газа в нескольких близких протопланетных дисках. Это стимулировало развитие комплексных моделей физической и химической структуры протопланетных дисков.

Мы представляем модель протопланетного диска ANDES (AccretioN Disk with Dust Evolution and Sedimentation), в которую включены детальные расчеты эволюции пыли, тепловой и химической структуры. Нами рассмотрены процессы переноса излучения в континууме, роста и оседания пылинок, нагрева и охлаждения газа, изучены влияние процессов эволюции пыли на газовую подсистему протопланетного диска и важность учета неравновесных процессов при расчете его термохимической структуры.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-02-00612.

**Т. П. Борисова**

Санкт-Петербургский государственный университет

**ВОЗМОЖНЫЕ ТРАЕКТОРИИ  
СТОЛКНОВЕНИЙ С ЗЕМЛЕЙ  
АСТЕРОИДА АПОФИС ПОСЛЕ 2036 г.**

Цель работы — нахождение и исследование траекторий возможных соударений с Землей астероида Апофис. Исследуются характеристики траекторий в зависимости от используемой модели движения. Для построения траекторий используется интегратор Эверхарта. Сравниваются соударения, полученные с использованием моделей DE405, DE423, EPM2008, а также наборов начальных данных Апофиса. Результаты свидетельствуют об устойчивости относительного положения и размеров областей, ведущих к соударениям, а также минимального геоцентрического расстояния. Для некоторых соударений известны характеристики, полученные в НАСА, наши результаты хорошо с ними согласуются.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы проведения фундаментальных исследований СПбГУ по приоритетным направлениям (грант 6.37.110.2011) и РФФИ (грант 11-02-00232-а).

## ВЛИЯНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО ЛИНЗИРОВАНИЯ НА ФУНКЦИЮ СВЕТИМОСТИ КВАЗАРОВ

Функция светимости (ФС) характеризует связь числа источников с их светимостью. Функции светимости галактик и квазаров отличаются друг от друга тем, что число квазаров уменьшается с ростом светимости более плавно. Расширение ФС квазаров может быть кажущимся эффектом, связанным с фокусировкой излучения ядер галактик на гравитационных линзах, попавших на луч зрения. С помощью дифференциальной функции вероятности линзирования из ФС ядер галактик получена функция распределения квазаров по видимой яркости, которую часто принимают за ФС квазаров. При анализе теоретической функции получены два важных следствия. В случае слабых квазаров значение показателя степени, характеризующего наклон, колеблется в пределах от  $-1$  до  $-2$ , как у ФС обычных галактик. В случае ярких квазаров наклон определяется в основном эффектом линзирования и ограничен снизу значением  $-3$ . Анализ ФС квазаров, проведенный в работе [1], дает возможность согласовать теоретически предсказанный предел наклона  $-3$  для ярких квазаров с наблюдательными данными. В работе [2] проводится обработка данных 2dF QSO+SDSS обзора 10 637 квазаров с  $0.4 < z < 2.6$ . Показатель степени  $\beta$  для ярких квазаров меняется в зависимости от удаленности квазаров. Для близких квазаров с  $z \sim 0.5$ ,  $\beta = -3$ , для  $z \sim 2.5$ ,  $\beta = -3.5$ . Таким образом, ФС галактик и близких квазаров не являются независимыми, а связаны посредством дифференциальной вероятности линзирования.

### Список библиографических ссылок

1. Бухмастова Ю. Л. Influence of gravitational lensing on the determination of the luminosity function of background objects // Астрофизика. — 2002. — Т. 45. — С. 231.
2. Croom S. M., Richards G. T., Shanks T. The 2dF-SDSS LRG and QSO Survey: the QSO luminosity function at  $0.4 < z < 2.6$ . [arXiv:0907.2727v1](https://arxiv.org/abs/0907.2727v1).

## ПЕРСПЕКТИВЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ

Если определить астрономию как науку, в основе которой массовые наблюдения звезд, сочетание «статистическая астрономия» будет логически оправданным. Звездная статистика, связанная с именами Ши Шен, Гиппарха, получила признание в конце XVIII в., когда Гершель, подсчитывая видимые в телескоп звезды на различных участках неба, построил первую модель Галактики. Введение Каптейном в конце XIX в. *статистических параллаксов* оказалось плодотворным для дальнейшего исследования структуры Галактики.

Основанными на статистике являются *функции блеска, светимости, звездной плотности, функция поглощения света*, начальная и современная функции масс, дающие оценку скорости звездообразования. Статистика позволяет выявить закономерности в физических, кинематических, геометрических характеристиках звезд и разделить их на однородные группы. Так составляются каталоги, анализ которых методом *статистических диаграмм* является эффективным в поиске генетических связей между звездами разных классов, что успешно решается в разделе статистической астрономии — *популяционный синтез*.

Объемы наблюдательных данных уже сегодня вылились в многочисленные электронные архивы всенебесных каталогов: HIPPARCOS, Tycho, USNO, 2MASS, SDSS и др. Экспоненциальный рост наблюдательных данных зарождает новую концепцию каталогов, компиляция которых должна быть объединена с результатами численных моделей. Осмысление прогнозируемых объемов данных в рамках проектов GAIA, E-ELT, LSST невозможно без статистической обработки, уже сегодня электронное листание терабайтовых каталогов требует не одного месяца.

Астрономические наблюдения давно вышли за пределы Галактики, активно исследуются области звездообразования в Магеллановых Облаках и других островках Местной группы, что дает в перспективе новый раздел астрономии — *статистическую Вселенную*.

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА КАТАЛОГА TORRES

Из большого числа звездно-статистических задач основное место занимает задача составления каталогов, обработка данных которых позволяет выявлять связи между различными характеристиками звезд, чтобы понять их свойства и эволюционный статус.

Один из новейших каталогов, представляющий данные о 95 разделенных тесных двойных системах (ТДС), рассматриваемых в качестве «чистых лабораторий» для изучения приливных эффектов, является каталог Torres [1]. Согласно классификационной схеме ТДС, разработанной Свечниковым в 1969 г., в соответствии с простыми критериями, такими как локализация компонентов ТДС на диаграмме Герцшпрунга—Рессела и степени наполнения полостей Роша, это класс *РГП*-систем (разделенные компоненты на Главной Последовательности). Тестирование звезд из [1] по схеме Свечникова показало, что 85 ТДС отвечают *РГП*-классу. OGLE 051019 и TZ For представляют ТДС с поздним гигантом III класса светимости со значительными избытками радиуса и светимости. AI Phe и V432 Aur — ТДС с субгигантами. RT And, BH Vir, CV Boo, UV Psc, CG Cyg, GU Boo — предконтактные ТДС, демонстрирующие пятенную активность солнечного типа.

Более 50 звезд из каталогов [1] и [2] общие. Учитывая более позднюю версию каталога [1], огромный интерес представляет выполнение для него статистической обработки с проекцией данных на теоретические эволюционные модели.

## Список библиографических ссылок

1. Torres G., Andersen J., Gimenez A. // *Astron. Astrophys. Rev.* — 2010. — Vol. 18. — P. 67.
2. Свечников М. А., Перевозкина Е. Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей *РГП*-систем. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 1999.



Д. Э. Ионов, Д. В. Бисикало,  
П. В. Кайгородов, В. И. Шематович  
Институт астрономии РАН

## ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АТМОСФЕРЫ ЭКЗОПЛАНЕТЫ СО ЗВЕЗДНЫМ ВЕТРОМ

В работе исследуется взаимодействие планеты класса «горячий юпитер» со звездным ветром. Проведено трехмерное численное газодинамическое моделирование системы звезда—планета с характеристиками, соответствующими параметрам системы HD 209458, после чего на основе полученного решения был построен профиль спектральной линии поглощения. Результаты моделирования показывают, что вблизи планеты образуется отошедшая ударная волна, отстоящая на несколько радиусов от ее поверхности. За отошедшей ударной волной находится сжатый нагретый газ, способный поглощать излучение в УФ-диапазоне. На фронте ударной волны возникают два потока, движущихся в противоположные стороны, что вызывает появление двух горбов в линиях поглощения. Данный результат объясняет результаты наблюдений транзита планеты HD 209458b, в ходе которых было установлено, что линии поглощения Si III и C II характеризуются нетривиальной двугорбой формой и большой глубиной транзита (8 %), намного превышающей фотометрическую глубину транзита (1.5 %). Расстояние между горбами линии, синтезированной по результатам численного моделирования, совпадает с данными наблюдений и составляет около 20 км/с, в то время как поглощение плотным веществом, находящимся за ударной волной, объясняет высокое интегральное поглощение в исследуемых линиях. На основе полученных результатов произведена оценка температуры атмосферы планеты HD 209458b (7 500—10 000 K).

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 09-02-00064, 09-02-00993, 11-02-00076, 11-02-01248, программы фундаментальных исследований Президиума РАН, а также ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (контракт 02.740.11.0247).

**МЕТЕОРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ  
НА ЗВЕНИГОРОДСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИНАСАН  
В 2011 г.**

Особенность метеорных наблюдений заключается в том, что заведомо неизвестны ни область на небесной сфере, ни время, когда произойдет событие. Кроме того, метеорные явления в атмосфере длятся порядка секунд и меньше. Существует ряд задач метеорной астрономии, для решения которых требуется не только регистрация метеоров в оптическом диапазоне, но и высокое пространственное и временное разрешение. Телевизионный метод является для таких задач наиболее приемлемым и поэтому повсеместно используется в практике метеорных наблюдений. В период с июля по август 2011 г. в ИНАСАН были проведены наблюдения метеоров с помощью мобильных патрульных телевизионных камер. Телевизионные мобильные установки, разработанные для наблюдений, состоят из следующих компонентов: черно-белых видеокамер высокого разрешения Watec LCL-902HS, широкоугольных фотографических объективов Canon 6/0.8 ( $F = 6$  мм, светосила 1:0.8) и системы подогрева входного окна от конденсации влаги. Поле зрения камер  $50^\circ$ , предельная звездная величина  $+4$ . Наблюдения проводились как односторонним методом, так и базисным. Для базисных наблюдений использовались два пункта (Звенигородская обсерватория и станция наблюдений недалеко от г. Истра). Наблюдения проводились с использованием программного комплекса UFO [1]. Все зафиксированные метеоры прошли отождествление с известными потоками. Представлено распределение численности метеоров по яркости.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 11-02-00203-а.

**Список библиографических ссылок**

1. SonotaCo. <http://sonotaco.com/soft>.

## **АННИГИЛЯЦИЯ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ ВБЛИЗИ КОМПАКТНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Любое гравитирующее тело, находящееся в поле частиц темной материи (ТМ), создает вокруг себя гало, состоящее из ТМ, связанное с бесстолкновительной фокусировкой частиц в произвольном гравитационном поле. Свойства образующегося гало существенным образом зависят от соотношения скорости гравитирующего тела и скоростей частиц ТМ. В случае когда скорость объекта меньше или порядка скоростей частиц ТМ, возникает регулярное гало вокруг гравитирующего тела.

Наиболее физически интересный случай возникает, если скорость гравитирующего объекта существенно больше типичных скоростей движения частиц ТМ. В данном случае возможно образование двумерной каустической особенности. В наиболее популярных современных моделях темной материи частица оказывается тождественна античастице. Таким образом, несмотря на то, что возникновение каустики естественно не приводит к расходимости полной массы, интенсивность процесса аннигиляции имеет логарифмическую особенность и возможно резкое усиление аннигиляционных процессов в данном случае.

Образующуюся каустику можно было бы детектировать как прямым способом, по наблюдению продуктов аннигиляции, так и косвенно, анализируя суммарный вклад в величину фона.

**О. В. Кочина<sup>1</sup>, Д. З. Вибе<sup>1</sup>,  
А. И. Васюнин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт астрономии РАН

<sup>2</sup>Университет Вирджинии, США

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ СЛОЖНЫХ МОЛЕКУЛ В ПРОТОЗВЕЗДНЫХ ОБЪЕКТАХ**

Представлены результаты применения метода химического моделирования к областям звездообразования ТМС-1С, хорошо изученной области формирования звезд малой массы, и DR21(ОН), области формирования массивных звезд, мало изученной с химической точки зрения. Рассмотрены различные модели, как газофазные, так и с учетом поверхностных реакций и различных населений пыли. При сравнении результатов расчетов с данными наблюдений проанализированы лучевые концентрации десятков молекул, начиная с простых двухатомных и до сложных органических соединений. Показано, что используемая химическая модель корректно воспроизводит обилия большинства исследованных компонентов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-02-00612.

## ОБРАЗУЮТСЯ ЛИ ЗВЕЗДЫ НА ГРАНИЦЕ ТУМАННОСТИ S 233?

Большое количество звезд Галактики рождается в результате механизма индуцированного звездообразования. Этот механизм может поддерживаться благодаря столкновению молекулярных облаков, взрывам сверхновых, расширению зон НII и другим процессам, приводящим к сжатию молекулярного газа. Однако до сих пор не известны случаи, когда звезды спектрального класса В, относящиеся к главной последовательности, вызывали сжатие окружающего вещества и рождение звезд.

Исследуемая область содержит звезду 2MASS 05383137+3551181, которая ионизирует и сжимает окружающий ее газ, а также окружающую ее туманность. Связь звезды с туманностью объясняется отсутствием других источников ионизации для туманности. Данная звезда является вполне типичным представителем звездного населения нашей Галактики. Однако ее исследования выявили некоторые интересные особенности, которые могут пролить свет на процессы звездообразования в Галактике.

По результатам исследования показано, что ионизирующая туманность звезда имеет спектральный класс B1.5 V. Эта звезда является звездой главной последовательности, исследование которых в контексте зон НII было произведено недостаточно подробно. Была определена скорость звезды, которая составляет  $-19.03$  км/с, что согласуется со скоростью газа в широкой окрестности зоны S 233. Это указывает на то, что звезда исходно образовалась в веществе туманности. Исследование пространственно-кинематической структуры молекулярного облака в пределах области S 233 позволило выделить сгусток вещества, имеющий красное смещение относительно родительского облака. По линиям CO была произведена оценка физических параметров данного сгустка: температура возбуждения вещества сгустка составила 10 K, а масса —  $1.5 M_{\odot}$ . Данная масса, полученная через оценку плотности CO, достаточна для образования новой звезды малой массы.

**П. А. Левкина, Н. С. Бахтигараев, В. В. Чазов**  
Институт астрономии РАН

**НАБЛЮДЕНИЕ МАЛОРАЗМЕРНОГО  
КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА В ТЕРСКОЛЬСКОЙ  
ОБСЕРВАТОРИИ В 2011 г.**

В 2011 г. в обсерватории на пике Терскол на телескопе Цейсс-2000 был проведен сеанс наблюдений космического мусора.

В течение двенадцати наблюдательных ночей были получены ПЗС-кадры 66 фрагментов. В основном наблюдались объекты на высоких орбитах (фрагменты космического мусора с большой полуосью свыше 40 тыс. км). Обработка наблюдений производилась с помощью программного комплекса Апекс-II.

Приводятся результаты позиционных и фотометрических наблюдений, улучшенные элементы орбиты объектов и их эволюция. Дана оценка эмпирического коэффициента — отношения средней площади объекта к его массе.

В. Н. Любимов<sup>1</sup>, М. А. Еремин<sup>2</sup>, Е. О. Васильев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт астрономии РАН

<sup>2</sup>Волгоградский государственный университет

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт физики ЮФУ

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБЛАКА НІ С УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Наибольшая часть массы межзвездного вещества сосредоточена в облаках различной плотности и размера, динамика и взаимодействие которых оказывают значительное влияние на эволюцию межзвездной среды. Одним из процессов, могущих оказывать серьезное влияние на структуру и химический состав облаков, является взаимодействие с ударными волнами, образующимися, например, при вспышках сверхновых.

Целью данной работы является исследование элементарного акта взаимодействия облака межзвездного газа НІ с плоской ударной волной. Разработан численный код для самосогласованного моделирования химической и динамической эволюции межзвездной среды. Динамическая модель описывает адвекцию смеси взаимодействующих газов. Применение технологий параллельного программирования позволило проводить многомерное моделирование с разрешением около 0.01 пк в двумерном случае (примерно 100 ячеек на радиус облака). Химическая модель включает более сорока реакций с участием одиннадцати компонент: Н, Н<sup>+</sup>, Н<sup>-</sup>, Н<sub>2</sub><sup>+</sup>, Н<sub>2</sub>, Нe, Нe<sup>+</sup>, С, С<sup>+</sup>, О, О<sup>+</sup>. Среди прочих учитываются реакции молекуляризации водорода на пыли, реакции с космическими лучами и фотореакции.

В результате проведенного детального численного моделирования с использованием разработанного программного комплекса сделаны следующие выводы:

- В процессе взаимодействия облака с ударной волной может стимулироваться образование молекулярного водорода вследствие развития теплехимической неустойчивости.
- Результат взаимодействия облака существенным образом зависит от начальной концентрации газа в облаке.

## О ПРОЦЕССЕ СТОХАСТИЗАЦИИ В ГРАВИТИРУЮЩИХ СИСТЕМАХ

Исследуется проблема эволюции звездных систем. Рассматривается концепция Н. С. Крылова [1], которая позволяет учесть вклад регулярных сил в процесс стохастизации в звездных системах. Производя вслед за В. Г. Гурзadyаном и Г. К. Саввиди [2] усреднение по пространству, удается получить формулу для оценки времени стохастизации. Задача сводится к вычислению математического ожидания квадрата безразмерного случайного ускорения в звездной системе. Исследование пространственно-однородной модели связано с использованием распределения Хольцмарка, для которого не существует моментов второго и более высоких порядков. Приближенные расчеты времени стохастизации выполнены для различных радиусов обрезания этого распределения.

Анализ результатов расчетов подтверждает необходимость использовать другое распределение на малых прицельных расстояниях. Результаты расчетов, выполненные на основании распределения И. В. Петровской [3], свидетельствуют о справедливости короткой шкалы стохастизации в звездных системах. Проанализирован характер зависимости отношения характерных времен от числа звезд для систем различных типов.

## Список библиографических ссылок

1. *Крылов Н. С.* Работы по обоснованию статистической физики. — М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1950.
2. *Gurzadyan V. G., Savvidi G. K.* Collective relaxation of stellar systems // *Astron. Astrophys.* — 1986. — Vol. 160, № 2. — P. 203.
3. *Petrovskaya I. V.* The force distribution for close encounters // *The few body problem* / Ed. by M. J. Valtonen. — Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1988. — P. 275.



## **ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ГАЛО ТЕМНОЙ МАТЕРИИ**

Задача выяснения внутреннего строения самогравитирующих вириализованных сгустков (гало темной материи) давно представляет большой интерес в астрофизике. Аналитически решить ее для космологических начальных условий пока не удастся, поэтому основным инструментом исследований являются численные эксперименты (решение задачи N-тел). Результаты современных расчетов не согласуются с наблюдательными данными о радиальном профиле плотности гало. В данной работе для детального изучения формы профиля гало и зависимости его характеристик от начального распределения вещества применяется численное моделирование со специальными упрощенными начальными условиями в виде трех плоских волн разной амплитуды.

Результаты проведенных численных экспериментов показали, что наиболее существенное влияние на профиль плотности гало оказывают момент первого коллапса и отношение амплитуд трех коллапсирующих волн, наличие тепловых скоростей и мелкомасштабных флуктуаций. При этом изменения момента коллапса и отношения амплитуд не влияют на форму профиля, в то время как другие два фактора приводят к уплощению профиля и уменьшению плотности в центре гало. Это дает надежду на решение проблемы каспов в рамках стандартной космологической модели с холодной либо «теплой» темной материей.

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ  
НАБЛЮДЕНИЯ И ДОПЛЕРОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ  
КАТАКЛИЗМИЧЕСКОЙ ПЕРЕМЕННОЙ  
V455 ANDROMEDAE**

В работе представлены результаты спектральных и фотометрических наблюдений катаклизмической переменной V455 Andromedae. По фотометрическим наблюдениям построены кривые блеска и построен амплитудный спектр мощности, который позволил выявить характерные периоды переменности системы. Сравнение амплитудного спектра мощности, полученного в работе, со спектром мощности, опубликованным в работе [1], показывает некоторые различия этих двух результатов. Проведенный анализ спектральных данных показал, что эмиссионные линии  $H\alpha$  имеют сложную форму и, по всей видимости, состоят из нескольких компонентов, появляющихся в разных газодинамических структурах, присутствующих в системе. Анализ томограмм, построенных на основании профилей линии  $H\alpha$ , показал, что в системе присутствуют такие газодинамические структуры, как аккреционный диск и ряд ударных волн. В частности, наблюдаются рукава приливной спиральной волны и «горячая линия». Анализ профилей эмиссионной линии  $H\alpha$  также показал, что, возможно, во время наблюдений в системе происходило сферическое истечение газа. Об этом свидетельствует наличие в профилях линии P Cygni-компонента.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 14.740.11.0084 федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 годы).

**Список библиографических ссылок**

1. *Araujo-Betancor S., Gänsicke B. T., Hagen H.-J. et al.* HS 2331+3905: The cataclysmic variable that has it all // *Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 430. — P. 629–642. [arXiv:astro-ph/0410223](#).

## **О КОРРЕЛЯЦИЯХ В ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ**

Рассмотрены двухвременные и двухточечные корреляции для ряда параметров движения звезд, а также для плотности и фазовой плотности моделей рассеянных звездных скоплений в окрестностях этих звезд. Определены время и радиус корреляции в пространствах указанных параметров. Анализ двухточечных корреляций приводит к выводу о существовании волн плотности, потенциала и фазовой плотности в моделях скоплений звезд. Вычислены распределения корреляций по величине корреляции в пространствах величин плотности и фазовой плотности. Исследована динамика таких распределений. Обнаружено нарастание корреляций со временем для 50 % рассмотренных моделей звездных скоплений. Таким образом, действие гравитационной неустойчивости в моделях рассеянных звездных скоплений заметно изменяет классический сценарий эволюции систем такого типа к состоянию устойчивого равновесия (с увеличением энтропии). Исследованы потоки в пространстве корреляций фазовой плотности. Рассмотренные модели скоплений эволюционируют в условиях, близких к балансу переходов в пространстве таких корреляций. Получены оценки времени релаксации моделей скоплений в пространстве корреляций фазовой плотности, которые хорошо согласуются с оценками времени развития неустойчивости функции фазовой плотности по отношению к малым начальным возмущениям фазовых координат звезд. Обнаружен доминирующий поток корреляций фазовой плотности из области больших по модулю корреляций в область малых по модулю корреляций. Такой поток приводит к появлению потока кинетической энергии к центру скопления. Получены оценки скорости нагрева ядер моделей скоплений этим потоком. Обнаружены признаки слабой турбулентности в движениях звезд ядра модели скопления с наибольшей степенью нестационарности в регулярном поле.

## КОРОНЫ РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ

Исследование внешних областей рассеянных звездных скоплений (РЗС) — гало и короны — представляет значительный интерес. Это обусловлено, в частности, тем, что данные области очень чувствительны к внешним гравитационным полям. Так, изучение размеров РЗС в окрестностях газозвездных комплексов [1] дало возможность оценить геометрические и динамические параметры комплексов.

Исследование внешних частей РЗС значительно осложнено тем, что большая часть скоплений проецируется на богатый звездный фон. Для выделения членов скоплений в их внешних областях приходится применять различные статистические методы с использованием всей доступной информации о звездах в широких окрестностях скоплений.

В настоящей работе для изучения гало и короны РЗС применяется построение двумерных карт распределения поверхностной плотности и профилей поверхностной плотности методом функции ядра для звезд, отобранных по фотометрическим признакам. Эти же методы использованы для изучения поведения звезд во внешних частях неизолированных N-body моделей РЗС, построенных в работах [2–4].

### Список библиографических ссылок

1. Данилов В. М., Селезнев А. Ф. Оценки геометрических и динамических параметров газозвездных комплексов в Галактике // Астрон. журн. — 1995. — Т. 72. — С. 333–343.
2. Данилов В. М., Дорогавцева Л. В. Временные шкалы механизмов динамической эволюции рассеянных звездных скоплений // Астрон. журн. — 2008. — Т. 85. — С. 1–13.
3. Данилов В. М. О колебаниях фазовой плотности в центрах шести рассеянных звездных скоплений // Астрон. журн. — 2010. — Т. 87. — С. 566–580.
4. Данилов В. М. О динамике рассеянных звездных скоплений // Астрон. журн. — 2011. — Т. 88. — С. 515–529.

## РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ КЕПЛЕРА В БЛИЗПАРАБОЛИЧЕСКОМ СЛУЧАЕ

Кинематическое уравнение задачи двух тел для близпараболического движения можно представить в виде

$$\frac{2}{3} t = F(z, \zeta). \quad (1)$$

Здесь

$$z = \zeta \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} F(z, \zeta) &= \frac{1 + \zeta^2}{4\zeta^3} i \ln \frac{1 - iz}{1 + iz} - \frac{(1 - \zeta^2)z}{2\zeta^3(1 + z^2)} = \\ &= \frac{1 + \zeta^2}{2\zeta^3} \operatorname{arctg} z - \frac{(1 - \zeta^2)z}{2\zeta^3(1 + z^2)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Соотношение (1) определяет  $t$  как функцию от  $z, \zeta$ . Нас же интересует  $z$  как заданная уравнением (1) неявная функция  $G$  от  $\zeta$ , зависящая от вещественного параметра  $t$ .

Многие малые тела Солнечной системы, а также часть ИСЗ и КА движутся по высокоэллиптическим орбитам. Чтобы тело покинуло систему с наименьшими энергозатратами, оно должно выйти на близкую к параболе гиперболическую орбиту. По такой же орбите движется и захватываемое планетной системой тело до тесного сближения с одной из планет.

Работа выполнена при поддержке Программы государственной поддержки ведущих научных школ РФ (проект НШ-3290.2010.2).

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ ОРБИТ ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТ МЕТОДОМ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ**

Исследование внесолнечных планет по-прежнему представляется одной из самых интересных тем современной астрономии. Определение их орбит становится важной частью небесной механики. В настоящее время существует несколько методов поиска внесолнечных планет, но основным методом поиска экзопланет по-прежнему является регистрация кеплеровых составляющих лучевых скоростей. Из 694 открытых на октябрь 2011 г. экзопланет 643 были обнаружены по доплеровскому смещению линий в спектре материнской звезды.

В работе [1] рассмотрена задача определения первоначальной орбиты внесолнечной планеты по кривой лучевой скорости (там же содержится обзор более широкой проблематики). Соответствующие уравнения представлены рядами по степеням эксцентриситета, а их решение — рядами по степеням известных величин порядка эксцентриситета. В данной работе получены уравнения в замкнутой форме и установлены существование и единственность решения при любых эксцентриситетах. Рассмотрен вопрос поиска эффективного алгоритма решения уравнений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам президента РФ для поддержки ведущих научных школ (грант НШ-3290.2010.2), Российского фонда фундаментальных исследований (грант 09-02-00230) и программы «Проведение фундаментальных исследований по приоритетным направлениям Программы развития СПбГУ» (грант 6.37.110.2011).

### **Список библиографических ссылок**

1. *Холшевников К. В., Толумбаева Д. А., Мюлляри А. А.* Определение первоначальных орбит внесолнечных планет методом лучевых скоростей: степенные ряды // Вестн. СПбГУ. — 2011. — Вып. 1. — С. 166—172.

## ВЕРТИКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА СТАЦИОНАРНЫХ АККРЕЦИОННЫХ ДИСКОВ С КРУПНОМАСШТАБНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

В работе исследуется влияние остаточного крупномасштабного магнитного поля на вертикальную структуру аккреционных дисков молодых звезд. Дифференциальное вращение в диске приводит к появлению азимутальной компоненты магнитного поля  $B_\varphi$ , вертикальный градиент которой может изменять толщину аккреционного диска. Параметрами, определяющими величину  $B_\varphi$ , являются отношение газового и магнитного давлений в срединной плоскости диска  $\beta_z = 8\pi\rho_0 V_s^2/B_z^2$  и магнитное число Рейнольдса  $R_m = V_\varphi H_0/\eta$ , где  $H_0$  — эффективная шкала высоты диска без магнитного поля;  $\eta$  — коэффициент диффузии магнитного поля. Из уравнения гидростатического равновесия с учетом градиента магнитного давления определена эффективная шкала высоты аккреционного диска с магнитным полем. Показано, что при условии непрерывности  $B_\varphi$  вблизи поверхности диска эффективная шкала высоты диска с магнитным полем будет меньше  $H_0$ . Если же зафиксировать величину  $B_\varphi$  на поверхности диска, то шкала эффективной высоты будет больше  $H_0$ .

## ГАЛАКТИЧЕСКИЕ ПОЛЯРНЫЕ КОЛЬЦА И ФОРМА ТЕМНОГО ГАЛО

Галактики с полярными кольцами — уникальный класс внегалактических объектов, позволяющий исследовать различные процессы, связанные с формированием и эволюцией галактик, а также свойства темного хост гало. В галактиках с полярными кольцами (ГПК) наблюдается вращение относительно двух осей: ее центральный звездный диск относительно своей видимой малой оси, а в почти перпендикулярной к нему плоскости вращается протяженная звездно-газовая структура — полярное кольцо. Такие объекты по видимому образуются в результате выпадения вещества с галактики-спутника или из газового филамента межгалактической среды либо же в результате центрального столкновения двух перпендикулярно ориентированных дисковых галактик. Поскольку в образовавшейся системе можно изучать вращение сразу в двух плоскостях, то эти галактики являются удобным объектом для исследования темного гало. По данным анализа обзора SDSS был составлен каталог ГПК и кандидатов в ГПК, включающий 275 галактик [1].

В данной работе, используя методы N-body и Tree-SPH с учетом самогравитации, были построены многомерные эволюционные модели галактических полярных колец с учетом внешнего гравитационного поля родительской галактики. По кинематике полярного компонента для некоторых галактик была изучена форма темного гало. Также в рамках трехмерного моделирования были оценены времена разрушения кольцевых структур в зависимости от параметров родительской галактики, формы и массы темного гало.

Работа выполнена при поддержке некоммерческого фонда Дмитрия Зимина «Династия».

### Список библиографических ссылок

1. *Moiseev A. V., Smirnova K. I., Smirnova A. A., Reshetnikov V. P.* A new catalogue of polar-ring galaxies selected from the Sloan Digital Sky Survey // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 418. — P. 244–257. 1107.1966.



## **ОЦЕНКА НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛИ ГЕОПОТЕНЦИАЛА EGM2008**

Модель геопотенциала EGM2008 содержит полный набор гармонических коэффициентов для шаровых функций в ряде Лапласа высоких степеней вплоть до  $n = 2159$ . Столь подробная модель позволяет вычислить параметры оценки Холшевникова—Антонова для общего члена ряда Лапласа по реальным данным и сравнить их с теоретическими ожиданиями. В данном докладе обсуждаются вопросы приведения исходных данных к промежуточному представлению: среднеквадратическим нормам сферических функций, обработки этих норм и оценки по ним искомым параметрам. Обсуждаются получаемые результаты и их точность.

Согласно оценке Холшевникова—Антонова сферические функции, участвующие в разложении гравитационного потенциала в ряд Лапласа, ограничены сверху отношением  $C/n^\sigma$ . Земля относится к группе объектов, для которых показано, что параметр  $\sigma$  не ниже  $5/2$  и скорее ближе к 3. Он определяет скорость убывания сферических функций. Вычисления по данным модели EGM2008 показали, что значение этого параметра соответствует теоретическому представлению. Отметим удивительный факт, что для участков ряда Лапласа с высокими степенями скорость убывания получилась даже выше ожидаемой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы проведения фундаментальных исследований СПбГУ по приоритетным направлениям (грант 6.37.110.2011) и РФФИ (грант 11-02-00232-а).

## Стендовые доклады

С. С. Беломестных, Н. Ю. Злобина  
Уральский федеральный университет

### **ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ СНИМКОВ WORLDVIEW-2 ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ХВОЙНОЙ И ЛИСТВЕННОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ**

Природные и антропогенные объекты имеют различную отражательную способность на разных участках электромагнитного спектра. Это свойство может быть использовано для классификации объектов, используя многоспектральные снимки дистанционного зондирования Земли.

В работе рассмотрено применение снимка, полученного с космического аппарата WorldView-2. Снимок имеет пространственное разрешение 2 м и восемь спектральных каналов в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Исследовался участок снимка города Екатеринбурга с изображением лесопарковой зоны.

Классификация снимка проводилась с использованием методов спектрального угла и спектрального информационного отклонения; использовались общедоступная спектральная библиотека опорных спектров университета Джонса Хопкинса (библиотека JHU), а также спектральная библиотека, сформированная по анализируемому снимку.

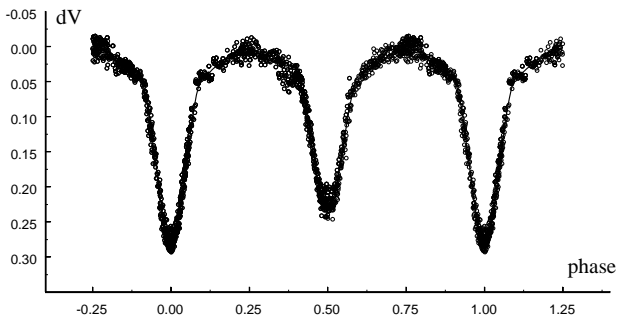
Спектральные библиотеки использовались для четырех типов объектов: хвойная растительность, лиственная растительность, инфраструктура и гидрография. Рассмотрен вопрос оценки точности классификации данных дистанционного зондирования.

Работа выполнена во время научно-исследовательской практики в отделе картографического мониторинга по данным дистанционного зондирования Земли ФГУП «Уралгеоинформ» в июле — августе 2010 г.

## РЕШЕНИЕ СКАНЕРНОЙ КРИВОЙ БЛЕСКА SZ Cam

Затменная переменная SZ Cam с массивными компонентами раннего спектрального класса O9—B0 является северным компонентом визуально-двойной звезды ADS 2984. Тесная двойная SZ Cam и ее визуальный спутник, имеющий такой же блеск ( $\sim 7^m$ ) и находящийся на угловом расстоянии  $18''$ , являются самыми яркими членами рассеянного звездного скопления NGC 1502.

С 1996 по 2007 г. на сканирующем электрофотометре телескопа АЗТ-3 ( $D = 0.45$  м,  $F = 2.0$  м) Коуровской астрономической обсерватории проводились фотометрические наблюдения этой затменной переменной звезды. Для устранения влияния блеска соседнего компонента использовался метод сканирования изображений. Многократно перекрытая наблюдениями наша кривая блеска SZ Cam является единственной полной кривой блеска, полученной за последние 20 лет в стандартной системе UBVR. Определение параметров компонентов SZ Cam проводилось методом синтеза кривой блеска с использованием кода Wilson—Devlinney. Пример моделирования кривой блеска в цвете V приведен на рисунке.



Сканерная и синтезированная (сплошная линия) кривые блеска SZ Cam

П. Е. Захарова, Д. В. Гламазда,  
Э. Д. Кузнецов, А. И. Шагабутдинов  
Астрономическая обсерватория УрФУ

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ВЫСОКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ТЕЛЕСКОПЕ СБГ КОУРОВСКОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ В 2011 г.

В 2011 г. на телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории УрФУ проводились наблюдения искусственных спутников Земли, движущихся по геосинхронным, супергеосинхронным, высокоэллиптическим и средневысоким орбитам.

Определено свыше 4000 положений для более чем 140 высокоорбитальных космических объектов. Построено 119 улучшенных орбит. С помощью программного комплекса *Celestial Mechanics* [1] для четырнадцати геосинхронных объектов и трех высокоэллиптических спутников получены оценки парусности (отношения площади миделева сечения к массе). Значения парусности лежат в пределах от 0.0057 до  $1.0 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Дальнейшие наблюдения этих объектов позволят установить диапазоны изменения парусности в зависимости от условий освещенности этих объектов. Особый интерес представляет задача поиска объектов с большими (превышающими  $1 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) значениями парусности. Орбитальная эволюция таких объектов в значительной степени определяется влиянием светового давления и имеет качественные отличия, обусловленные эффектом Пойнтинга—Робертсона.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг.).

### Список библиографических ссылок

1. *Butler G. Methods of Celestial Mechanics. Vol. 2.* — В. ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2005.

## ЭВОЛЮЦИЯ ОРБИТ ГЕОСИНХРОННЫХ СПУТНИКОВ «ГОРИЗОНТ» И STTW-T2

В работе приводятся результаты вычисления элементов орбит геосинхронных спутников «Горизонт» и ГСС STTW-T2, полученные по ПЗС наблюдениям на камере СБГ Астрономической обсерватории УрФУ, и долгопериодическая эволюция элементов их орбит, полученная в результате численного моделирования движения на интервале 15 лет. ПЗС наблюдения исследуемых объектов были выполнены в период с 14 апреля 2007 по 17 марта 2011 г., а моделирование движения — от эпохи  $JD = 2451193.5$  (13–14 января 1999 г.).

Сравнение результатов показывает, что численное моделирование движения ГСС, выполненное с помощью программы [1], достаточно хорошо аппроксимирует изменение наклона  $i$ , долготы восходящего узла  $\Omega$  и долготы подспутниковой точки  $\Lambda$ , полученных по наблюдениям. Максимальные разности составляют: в наклоне —  $0.7'$ , в долготе восходящего узла —  $7.8'$  и долготе подспутниковой точки —  $1.4^\circ$ . Это позволяет уверенно выполнять идентификацию объектов во время наблюдений (по  $i$  и  $\Omega$ ).

При наблюдениях геосинхронных спутников с большими амплитудами либрации неизбежно возникает задача предвычисления появления спутника в зоне видимости данного пункта наблюдений. Результаты показывают, что эта задача может успешно решаться на основе анализа изменений долготы подспутниковой точки. С этой целью выполняется моделирование движения ГСС от некоторой эпохи на довольно большом интервале времени и по изменению  $\Lambda$  определяются интервалы, когда данный ГСС будет находиться в близэкваториальной зоне, видимой с пункта наблюдений.

## Список библиографических ссылок

1. Бордовицкая Т. В., Батулин А. П., Авдюшев В. А., Куликова П. В. Численная модель движения ИСЗ. Новая версия // Изв. вузов. Физика. — 2007. — Т. 50, № 12/2. — С. 60–65.

## СЛЕДЫ РАННЕЙ ХИМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИК

Известно, что современные галактики образовались иерархическим образом посредством слияния маломассивных ( $\sim 10^4\text{--}10^5 M_\odot$ ) гало темной материи. При этом до момента слияния в некоторых из этих гало уже могли проходить процессы звездообразования, а значит и химическое обогащение газа.

Обогащение производилось звездами населения III — чрезвычайно массивными ( $\sim 100\text{--}300 M_\odot$ ) и короткоживущими звездами, образовавшимися практически из чистого водорода и гелия, т. е. имеющими нулевую металличность. Такие звезды можно назвать первыми звездами. Они заканчивали свою эволюцию либо как черные дыры, либо взрывались и полностью разрушались как аннигиляционно-неустойчивые сверхновые (англ. *PISN*).

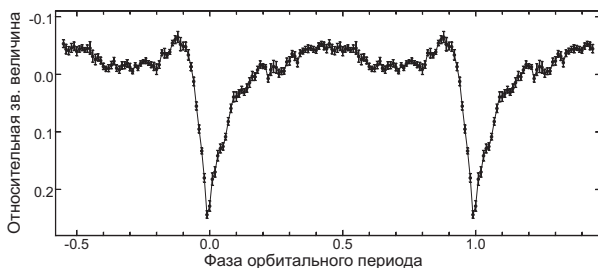
Нуклеосинтез в звездах населения III имел характерные особенности, не свойственные современному нуклеосинтезу. Поэтому газ, обогащенный первыми звездами, имел характерный химический состав, который должен был «отпечататься» в маломассивных долгоживущих звездах последующих поколений. Такие звезды могли сохраниться до наших дней и, будучи обнаруженными, стать важными свидетелями ранней химической эволюции.

В предлагаемой работе изучается возможность существования и обнаружения звезд, химический состав которых может отражать раннюю химическую эволюцию Галактики.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-02-00231, а также ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (контракт 02.740.11.0247).

## ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАТМЕНИЙ В КАТАКЛИЗМИЧЕСКОЙ ПЕРЕМЕННОЙ IPHAS J025827.88+635234.9

О катаклизмической переменной IPHAS J025827.88+635234.9 утверждалось, что она имеет очень большую светимость и может принадлежать к типу звезд V Sge. В таких звездах происходит ядерное горение аккрецируемого водорода, и они являются прародителями сверхновых типа Ia. Кривые блеска таких звезд или квазисинусоидальны, или показывают затмения, при которых главный и вторичный минимумы очень широки (0.4–0.5 фазы). В августе–октябре 2011 г. на 70-см телескопе Коуровской обсерватории мы провели первые фотометрические наблюдения этой звезды. Индивидуальные кривые блеска отчетливо показали затмения. С помощью Фурье-анализа и дисперсионного анализа был найден их период  $5.882 \pm 0.010$  ч. На свернутой кривой блеска (см. рисунок) можно видеть, что минимумы узкие (не более 0.2 фазы), а вторичные минимумы отсутствуют, что не типично для звезд типа V Sge. Такие узкие асимметричные минимумы характерны для обычных новоподобных звезд и объясняются затмениями аккреционного диска, а асимметрия вызвана тем, что минимум приходится на фазы снижения яркости горячего пятна. Очевидно, IPHAS J025827.88+635234.9 не принадлежит к типу V Sge.



Свернутая кривая блеска IPHAS J025827.88+635234.9

А. В. Кожевникова<sup>1</sup>, В. П. Кожевников<sup>1</sup>,  
И. Ю. Алексеев<sup>2</sup>, И. А. Юшков<sup>1</sup>, А. А. Дорогов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт

«Крымская астрофизическая обсерватория»

## РАСПОЛОЖЕНИЕ АКТИВНЫХ ДОЛГОТ В ДВОЙНОЙ СИСТЕМЕ CG Cyg

Представлены результаты анализа распределения пятен по долготе на главном компоненте системы CG Cyg (G9+K3,  $P = 0.63^d$ ), относящейся к классу короткопериодических звезд типа RS CVn, проявляющих активность солнечного типа. На основе архивных данных за всю историю фотометрических наблюдений этой системы с 1965 по 2009 г., а также с использованием наших новых (2005—2009) многоцветных фотометрических (в полосах В, V, R и I) наблюдений, проведенных на 70-см телескопе Коуровской астрономической обсерватории УрФУ, показано, что активные долготы на CG Cyg не всегда расположены фиксированно, как считалось ранее, а изменяют свое положение на диске. Большую часть времени, с 1965 по 2003 г., пятна концентрировались к двум активным долготам, расположенным в квадратурах, на орбитальных фазах  $0.28 \pm 0.06$  и  $0.70 \pm 0.08$ , а меньшую часть времени, с 2004 по 2009 г., — вблизи линии, соединяющей центры компонентов, на орбитальных фазах  $0.50 \pm 0.04$  и  $0.93 \pm 0.05$ . Положение активных долгот разделено на  $0.42 \pm 0.12$  орбитального периода. Обнаружена корреляция расположения активных долгот и общей площади запятненности фотосферы звезды. При расположении активных долгот вдоль линии центров площадь пятен менялась незначительно и составляла 13—16 % полной поверхности звезды, что близко к исторически максимальному значению запятненности CG Cyg. Существование активных долгот указывает на неосесимметричную структуру магнитного поля в двойной системе CG Cyg.



## РАСЧЕТ ПРОИЗВОДСТВА ЭНТРОПИИ ДЛЯ РЯДА РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ С ВОЗРАСТОМ ОТ 0.005 ДО 1.699 МЛРД ЛЕТ

Производство энтропии является важнейшей теплофизической характеристикой неравновесных процессов. Однако этому параметру уделяется мало внимания при анализе эволюции отдельных звезд и звездных скоплений. Цель данной работы — используя наблюдаемые фотометрические параметры, рассчитать эффективную температуру и производство энтропии для рассеянных звездных скоплений с возрастом от 0.005 до 1.699 млрд лет.

Для нахождения эффективной температуры и интегральной светимости использовались показатель и избыток цвета, модуль расстояния и видимая звездная величина (из баз данных WEBDA, GCG). С точностью до численных констант плотность производства энтропии прямо пропорциональна кубу эффективной температуры, а производство энтропии прямо пропорционально интегральной светимости и обратно пропорционально эффективной температуре.

В результате расчетов 27 рассеянных звездных скоплений: 1) построены распределения значений (эффективной температуры, светимости, плотности производства энтропии и производства энтропии) звезд для каждого из скоплений; 2) проведена проверка на нормальность этих распределений (по критериям Колмогорова—Смирнова и  $\chi^2$ ), которая показала, что для 67 % скоплений (в основном молодых) эффективная температура распределена по нормальному закону; 3) обнаружено, что с увеличением возраста рассеянного звездного скопления сужается интервал светимости и эффективной температуры, в котором распределены звезды, что подтверждается расчетами дисперсии; 4) показано, что средние по выборке значения эффективной температуры, светимости, плотности производства энтропии и производства энтропии с увеличением возраста скопления уменьшаются.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ В ОКРЕСТНОСТИ РЕЗОНАНСА 1:2 ПРИ БОЛЬШИХ ЗНАЧЕНИЯХ ПАРУСНОСТИ

При движении спутника вокруг Земли может наблюдаться явление резонанса, обусловленного влиянием тессеральных гармоник гравитационного поля Земли. На характер орбитальной эволюции спутников, обладающих большой парусностью (отношением площади сечения к массе) существенное влияние оказывают силы светового давления. При движении спутника в окрестности резонансных зон возмущения, вызываемые световым давлением, могут приводить к качественным изменениям орбитальной эволюции.

В данной работе была изучена резонансная структура областей движения спутников навигационных систем GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, а также спутников типа «Молния». Положение резонансной области в околоземном пространстве получено на основе исследования долгопериодической эволюции элементов орбиты при различных значениях парусности с помощью «Численной модели движения ИСЗ» [1]. Изучено влияние светового давления на эволюцию орбиты спутника.

### Список библиографических ссылок

1. *Бордовицына Т. В., Батурич А. П., Авдюшев В. А., Конева П. В.* Обновленный комплекс программ «Численная модель движения ИСЗ». — Томск : Изд-во Томск. ун-та, 2004.

## ГИРАЦИОННЫЙ РАДИУС

Понятие гирационного радиуса появилось, по-видимому, впервые на русском языке в статье Г. Н. Ресселя «О происхождении двойных звезд» в сборнике серии 3 «Новые идеи в астрономии», опубликованном в 1914 г. в переводе с английского. Это понятие используется до сих пор в работах по двойным звездам. В. А. Крат в своей монографии 1950 г. «Фигуры равновесия небесных тел» так определяет гирационный радиус, который некоторые авторы стали переводить на русский язык как «радиус жирации»: под радиусом жирации ( $g$ ) мы будем подразумевать такое расстояние от оси вращения тела, с помощью которого можно представить момент инерции этого тела в виде момента инерции материальной точки с массой ( $m$ ), находящейся на расстоянии ( $g$ ) от оси вращения. Момент инерции шара однородной плотности равен  $I = 0.4R^2m$ . Отсюда следует, что гирационный радиус однородного шара равен  $g = \sqrt{0.4R^2}$ . В физике на русском языке имеется аналогичное понятие — радиус инерции. В. Г. Фесенков, однако, основываясь на той же формуле для  $I$ , называет  $k$  радиусом жирации. В настоящее время чаще используется понятие «безразмерный момент инерции», что соответствует величине  $I/R^2m = k$ , где  $k < 0.4$  характеризует степень неоднородности небесного тела. Для примера В. Г. Фесенков для величины  $k$ , соответствующей звезде с индексом политропы 2, указывает  $k = 0.2$ . Для Земли величина  $k$  принимается близкой 0.33. В справочнике К. У. Аллена «Астрофизические величины» в таблице физических характеристик планет указан не момент инерции, как следует из заголовка, а безразмерный момент инерции.

## **СОЗДАНИЕ И МОДЕРНИЗАЦИЯ ИНТЕРФЕЙСОВ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПРИБОРОВ КОУРОВСКОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ**

В Коуровской астрономической обсерватории идет активная модернизация старого оборудования и разработка новых приборов. В связи с этим была поставлена задача создать универсальный шаблон для графического пользовательского интерфейса управления приборами в операционной системе Windows. В дальнейшем шаблон можно легко адаптировать под конкретные требования.

На основе универсального шаблона написан графический интерфейс управления оптоволоконным спектрографом высокого разрешения. Использовалась система команд, предоставленная производителем. Программа позволяет управлять всеми узлами спектрографа через последовательный порт компьютера или порт USB.

Для управления фотометром 1.2-метрового телескопа и солнечным телескопом разработаны контроллеры, поддерживающие одинаковый синтаксис команд. Создана универсальная программа, позволяющая управлять этими контроллерами через последовательный порт компьютера. Пользователь может применять командную строку, общую для всех приборов, или же графический интерфейс, адаптированный к конкретному прибору.

На основе разработанного универсального шаблона графического интерфейса предполагается реализовать управление и другими приборами обсерватории.

Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы».

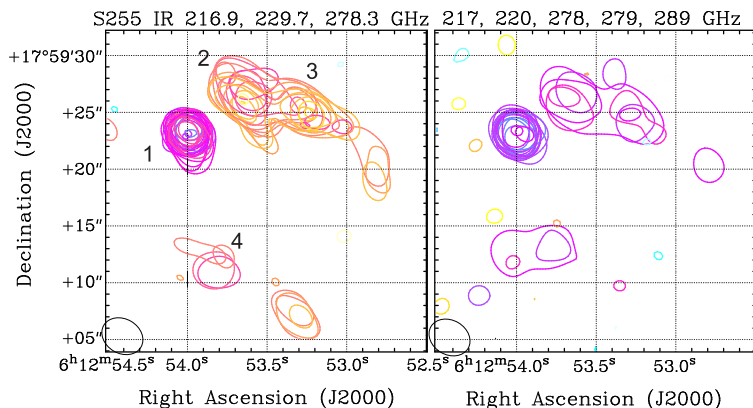
## **ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

В ходе анализа долготно-временных рядов индексов пятнообразовательной деятельности Солнца получены результаты, характеризующие особенности долготного распределения зон пятнообразования Солнца, которые хорошо согласуются с итогами работ, проведенными ранее в этой области исследований. Получены эмпирические подтверждения разрабатываемым в последние годы теоретическим представлениям о неосесимметричном магнитном поле, на основе которого можно объяснить наблюдаемый феномен солнечных активных долгот.

## МОЛЕКУЛЯРНЫЕ СГУСТКИ В S255 IR В РАДИОЛИНИЯХ МЕТАНОЛА

По данным наблюдений на интерферометре SMA в лазерных и квазитепловых линиях метанола (216.9–289.9 ГГц) в S255 IR обнаружены молекулярные сгустки (1–4) с лучевыми скоростями в интервалах 3.5–6.5 и 7–9.5 км/с (см. рисунок), расположенные на границе наблюдаемого в линиях СО [1] истечения. Предполагается, что метанол отслеживает границы каверны, образованной истечением.

Физические параметры рассматриваемых сгустков, оцененные по квазитепловым линиям метанола, характерны для объектов, подвергшихся воздействию ударной волны.



S255 IR: распределение излучения в лазерных (слева) и квазитепловых (справа) линиях метанола

## Список библиографических ссылок

1. Wang Y., Beuther H., Bik A. et al. Different Evolutionary Stages in the Massive Star Forming Region S255 Complex // Astron. Astrophys. — 2011. — Vol. 527. — P. Id.A32.

## РЕЗОНАНСЫ В НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКЕ

Понятие соизмеримости средних движений ввел в конце XVIII в. Лаплас при изучении особенностей движения Юпитера и Сатурна. В дальнейшем подобные соизмеримости были обнаружены во многих планетных и спутниковых системах. Впоследствии явления отношения периодов планет или спутников как небольших целых чисел получило название резонансов.

В 1857 г. Дэниел Кирквуд (Daniel Kirkwood) обнаружил «провалы» в поясе астероидов, которые объяснил резонансами между малыми планетами и Юпитером. Им также были открыты резонансы в системе колец Сатурна. В 1906 г. в точках системы Солнце—Юпитер были обнаружены астероиды, получившие наименования греков и троянцев. Они находятся в резонансе 1:1 к Юпитеру. Впоследствии такие астероиды были обнаружены у Нептуна, Марса и Земли.

В 1965 г. с помощью радиолокационных наблюдений был измерен период вращения Меркурия вокруг своей оси, который оказался в резонансе с его орбитальным периодом. Такой же эффект был обнаружен у Венеры. В 1961 г. Л. М. Лидов, а в 1962 г. независимо от него Я. Кодзай (Y. Kozai) обнаружили интересное явление изменения эксцентриситета орбиты спутника при большом наклоне ее к плоскости орбиты планеты — так называемый резонанс Кодзай—Лидова.

Во второй половине XX в. был обнаружен еще один вид резонансов — периодические орбиты или хореографии. Уже показано, что часть хореографий обладает устойчивостью и, следовательно, может существовать в природе. В конце XX в. обнаружены резонансы в экзопланетных системах.

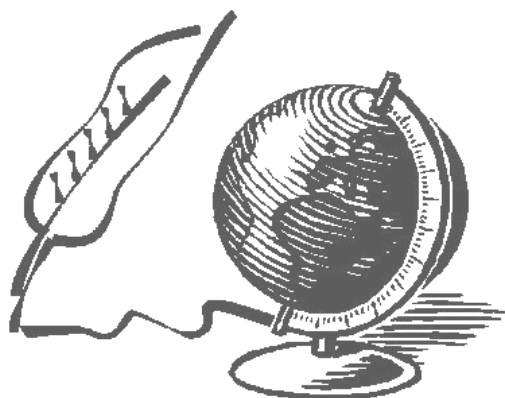
В настоящей работе показана история открытия и изучения резонансов в небесной механике, их влияния на динамику и эволюцию планетных и звездных систем. Сделана попытка классификации небесно-механических резонансов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 11-02-00232а, а также Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ (грант № НШ-3290.2010.2).





# Из истории науки





## **МИХАИЛ СЕРГЕЕВИЧ МОЛОДЕНСКИЙ И ЕГО РОЛЬ В СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЯХ О ФИГУРЕ ЗЕМЛИ**

Среди многих известных имен отечественных геодезистов выделяется имя Михаила Сергеевича Молоденского, основоположника современной теории фигуры Земли, выдающегося геодезиста и геофизика. 15 июня 2009 г. исполнилось 100 лет со дня рождения ученого. Это он в середине XX в. своими работами освободил геодезию от гипотез о внутреннем строении Земли, превратил ее в точную науку, ввел понятие квазигеоида.

М. С. Молоденский (15.06.1909 — 12.11.1991) родился в семье священника в уездном городке Елифани Тульской губернии. Он был пятым ребенком (всего было шестеро детей). Уже с детства он проявлял особое стремление к учебе, знаниям. В средней школе, где учился Молоденский, физику и математику преподавали замечательные учителя. Из однокашников Молоденского трое стали докторами наук.

В 1923 г., когда ему исполнилось 14 лет, он уехал в Тулу к своему дяде врачу Татевскому и стал учиться в железнодорожной школе. После ее окончания Михаил не смог поступить в вуз, так как ему еще не исполнилось 18 лет, которые требовались для абитуриентов. Пришлось целый год работать счетоводом в Подгородном лесничестве Ясной Поляны. Социальное происхождение Молоденского также являлось в то время препятствием для поступления в вуз. Друг детства Ю. М. Пятин помог Молоденскому поступить на астрономическое отделение Московского университета на место, освободившееся после ухода одного из студентов. Сыну священника не дали стипендии и возможности проживания в общежитии. Около двух лет ему пришлось бедствовать, пока не появилась возможность подработать на геодезической практике.

В 1930 г., в период обучения Молоденского в университете, прошла кампания по приближению студентов по специальности «Астрономия» к практическим потребностям страны. Даже была предпринята попытка ликвидировать астрономическую специальность.

Группе из пяти астрономов: Молоденскому (старосте группы), Звереву (ставшему в будущем выдающимся астрометристом, членом-корреспондентом АН СССР, возглавившему в 1941 г. в Екатеринбургe Службу времени), Еремееву, Петрову, Мессене (позднее он был исключен за непролетарское происхождение) было предложено учиться по специальности «Геодезия и гравиметрия». Студенты не согласились с этим предложением и стали совмещать обучение и по специальности «Астрономия», и по специальности «Геодезия и гравиметрия». По просьбе студентов этой группы курс «Высшая геодезия» прочитал Ф. Н. Красовский, заслуги которого перед отечественной геодезией огромны. «Теорию фигуры Земли» читал А. А. Михайлов, в будущем академик, директор Пулковской обсерватории. В 1931 г. М. С. Молоденский и его товарищи окончили университет, но дипломы им выдали по специальности «Астрономия». Это был единственный выпуск в МГУ, связанный с практической надобностью в специалистах по геодезии и гравиметрии.

После окончания университета в 1931 г. учитель Молоденского С. Н. Блажко пригласил его на работу в Астрономо-геодезический НИИ МГУ, который позже вошел в состав созданного Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга при МГУ (ГАИШ). Вскоре он переходит на основную работу в Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэрофотосъемки и картографии (ЦНИИГАиК), который в то время находился в Ленинграде. Через несколько лет ЦНИИГАиК перевели в Москву. В 1933 г. Молоденский руководил гравиметрической экспедицией в Крыму. В 1934 г. участвовал в работе 7-й конференции Балтийской геодезической комиссии, где выступил с сообщением о строгом решении при измерении силы тяжести влияния сокачания при парных качаниях маятников с различными амплитудами и произвольными фазами.

В 30-е гг. прошлого века широкое распространение получили маятниковые приборы при измерении силы тяжести, появились гравиметры. В это же время актуальной стала задача создания основы геодезического и картографического изучения огромной территории СССР. Ф. Н. Красовский обозначил проблему использования гравиметрической маятниковой съемки для решения этой задачи. В практику гравиметрических работ вошло астрономо-гравиметрическое нивелирование, метод которого был разработан М. С. Молоденским. Он в это время возглавил комиссию, перед которой стояли две важные задачи: проверить приборную базу для выполнения гравиметрических работ; выполнить отбраковку устаревших маятниковых

приборов; создать каталог всех маятниковых пунктов СССР. Проведение М. С. Молоденским, М. С. Зверевым, Н. Н. Парийским и Ю. Д. Буланже сравнения для 10 тысяч маятниковых пунктов априорной и фактической погрешностей выявило практически полное совпадение их значений, что свидетельствовало о постоянно возрастающей точности полевых измерений.

Для измерения силы тяжести в полевых условиях Молоденским был изобретен, а затем и изготовлен в 1938–1940 гг. с помощью А. М. Лозинской, Н. П. Грушинского и механика В. М. Гущина оригинальный статический гравиметр. С 1943 г. М. С. Молоденский работает в МИИГАиК и читает лекции по гравиметрии и теории фигуры Земли. В период Великой Отечественной войны появился первый в нашей стране пружинный гравиметр кольцевой Молоденского (ГКМ). Около 100 экземпляров этого гравиметра было выпущено в 1945 г. под руководством Н. Б. Сажинной. На базе данного гравиметра была создана более совершенная модель гравиметра кольцевого астазированного (ГКА), в разработке которого Молоденский принял самое активное участие.

Вопросу редукиции силы тяжести к уровню моря посвящены сотни работ, трактующих его с разнообразных точек зрения; предложено значительное число методов редуцирования, каждый из которых обладает рядом преимуществ и недостатков. Как отмечает Молоденский в своей книге «Основные вопросы геодезической гравиметрии», «возможны два пути для уяснения принципиальной стороны вопроса о редукиции силы тяжести.

Первый путь берет начало от Стокса. Он характерен тем, что с самого начала условия задачи упрощаются тем, что вместо реальной Земли рассматривается Земля, у которой массы, лежащие вне геоида, тем и или иным способом перемещены вовнутрь геоида или на его поверхность. Тогда всюду вне геоида потенциал становится функцией регулярной. Таким образом, исходным объектом исследования является регуляризованная Земля, а способ регуляризации определяет метод редуцирования силы тяжести к уровню моря.

Второй путь, впервые намеченный Джеффрисом в 1932 г., характерен тем, что рассматривается реальная Земля без предварительной ее регуляризации. Идя по второму пути, можно не задаваться заранее определенным типом редукиции и даже не считать этот вопрос отдельным и самостоятельным. Этот путь позволяет глубже понять существо проблемы».

В начале XIX в. было введено понятие «поверхность Земли в геометрическом смысле», а в 1872 г. Листинг предложил за теоретическую фигуру Земли принимать геоид («землеподобный»). В середине XX в. М. С. Молоденский при строгом рассмотрении этого понятия пришел к выводу, что для определения геоида необходимо знать «плотность в каждой точке для всех масс, которые находятся вне геоида». Он приходит к заключению, что «даже при наличии исчерпывающих геологических данных достаточно точное редуцирование на геоид связано с решением сложной задачи теории потенциала, так как редуцирование ведется на неизвестную поверхность геоида с весьма сложной и также неизвестной физической поверхности Земли, на которой краевые значения определяются непосредственно наблюдениями». С. М. Молоденский предложил революционную перестройку в геодезии: определять фигуру физической поверхности Земли без привлечения данных о ее внутреннем строении, а значит не приближенно изучать геоид, а изучать поверхность Земли и ее внешнее гравитационное поле в единой системе координат с точностью, которой соответствуют выполненные измерения. Этими исследованиями были заложены основы современной пространственной геодезии, которые М. С. Молоденский развил и изложил в монографии «Методы изучения гравитационного поля и фигуры Земли» (1960). Идея астрономо-гравиметрического нивелирования была высказана М. С. Молоденским, а привлечение гравиметрических данных для его реализации — Ф. Н. Красовским.

В 2010 г. исполнилось 65 лет со времени выхода книги «Основные вопросы геодезической гравиметрии». В 2005 г., когда отмечали 60-летие появления этой книги, автору данной публикации экземпляр издания прислала в подарок Мария Ивановна Юркина, с которой мы были в дружеских отношениях, переписывались, обсуждали научные, да и порой житейские проблемы более 20 лет. Мария Ивановна была ученицей М. С. Молоденского, последовательницей его направления в науке, скромным, отзывчивым человеком. Год назад ее не стало, но остались эта книга в скромной серой обложке, вышедшая тиражом 500 экземпляров, и ее мнение о значении работы Молоденского в наше время. Вот выдержка из ее письма от 31.12.2005 : «В "Геодезии и картографии" много статей о значении этой книги. Теперь в системе нормальных высот обрабатывают объединенную нивелирную сеть Европы и Китая. Но группа европей-

ских геодезистов-профессоров во главе с Хеком (В. Неск) объединилась в стремлении доказать, что без гауссова геоида никак нельзя обойтись. В общем, как заметил Макс Планк: не побеждают новые идеи, а вымирают носители старых».

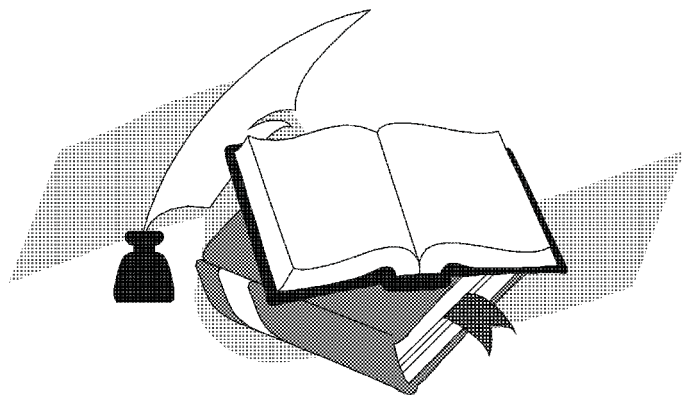
Поясним, в чем значение этой книги, которая была защищена в МИИГАиКе в качестве диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Ученая степень кандидата технических наук М. С. Молоденскому была присуждена в 1938 г. без защиты диссертации. 4 декабря 1946 г. он был избран членом-корреспондентом АН СССР за выдающуюся работу в области геодезической гравиметрии. Задача геодезии по Молоденскому заключается в определении внешнего гравитационного поля и поверхности Земли в единой системе координат во времени и изучение их столь точно, сколь позволяют измерения. Молоденским были введены новые понятия, например, нормальные высоты, квазигеоид, аномалия высоты. Нормальные высоты вычисляются по измеренным данным, аномалии высот (высоты квазигеоида) определяются внешним возмущающим потенциалом и строго согласованы с нормальными высотами. При этом аномалии высот стали относиться к точкам земной поверхности. Аномалии силы тяжести по способу вычисления не изменились, но стали определяться на земной поверхности. Любые измеряемые величины никуда не следует редуцировать, а для сравнения измеряемых величин с нормальными последние следует вычислять по возможности в местах измерений. Краевое условие для возмущающего потенциала должно относиться не к поверхности геоида, а к поверхности реальной Земли, где выполняются все геодезические измерения. Теория Молоденского рассматривает и использует именно те измерения, которые можно реально выполнять в настоящее время или в будущем, она объединила изолированные разделы геодезии, как, например, триангуляцию и нивелирование, установила их взаимосвязь, освободила геодезию от принципиальной приближенности ее решений. Новые виды измерений, в том числе и пока не созданные, хорошо вписываются в эту теорию, предъявляя лишь повышенные требования к ее точности.

Заслуги М. С. Молоденского высоко оценены: ему присуждены Государственные премии в 1946 г. за теорию определения фигуры Земли и ее гравитационного поля и разработку метода астрономо-гравиметрического нивелирования и в 1951 г. за создание первого отечественного гравиметра ГКМ, на основе которого после войны был создан геофизиками прибор ГКА и налажено его производство.

С 1956 г. основным местом работы М. С. Молоденского становится Институт физики Земли АН СССР. Научные интересы ученого в этот период связаны с разработкой теории вращения Земли, теорией ее свободных колебаний, нутации и приливных деформаций Земли. За эти исследования в 1963 г. М. С. Молоденскому была присуждена Ленинская премия. В 1989 г. вышла в свет его последняя монография «Общая теория упругих колебаний». До последних дней М. С. Молоденский трудился, он посвятил свою жизнь изучению Земли: ее фигуры, внешнего гравитационного поля, внутреннего строения, влияния вынужденной и свободной нутации оси вращения на изменение угловой скорости вращения Земли. Значение исследований М. С. Молоденского, его вклад в геодезию, гравиметрию, теорию фигуры Земли со временем возрастает, вызывая неизменный интерес у студентов, аспирантов, преподавателей, научных сотрудников в нашей стране и за рубежом.



# Литературные страницы





Н. Д. Калинина

## Полине Евгеньевне Захаровой на 70-летие

От века убрана короной звездной...

*В. Брюсов*

Алтарь науки беспощадно  
Прожорлив — черною дырой  
Жизнь поглощает страстно, жадно  
И беззастенчиво порой.

Все астрономы «ненормальны» —  
В их клане нет пустых умов:  
Мужчины просто уникальны,  
А женщины чудесней снов!

О русской женщине слагать бы оды...  
Не только в «избу» — во дворец войдет!  
Сама себе указ и мода —  
Сама проблемы создает.

О да, строга, бывает грозной —  
Но милосердней в мире нет.  
«От века убрана короной звездной» —  
Несет ее как крест,  
несет ее как СВЕТ!

*март 2010*

А. А. Соловьев

## Предчувствие Января

Неизбежный Январь,  
неизбежного Нового года...  
Всё опять повторится, как встарь,  
И высокую глубь небосвода  
обесцветит белёсая хмарь  
до весны, до недели пасхальной...  
А пока на пороге — Январь!

Отчего так бледна киноварь  
этой буквы заглавной  
в конце алфавитного свода?  
Неужели прочитан  
от корки до корки Букварь?

... Не по первому снегу бреду  
Сквозь есенински чистое поле,  
Чёрных листьев тревожу гряды,  
Обходя грязь и тлен, поневоле  
непрямую дорожку веду...  
И кружит над землей непогода,  
и весь мир задыхается, точно в бреду,  
Завершается пьеса,  
звучит неизбежная кода,  
И уже непонятно, зачем и куда я иду...

*2 октября 2011*

## ЭЛЕГИЯ

Учителей уж нет — ушли далёко,  
Оставив нас наедине с собой,  
Ровесников немало ненароком  
моих забрав печальною гурьбой.

Всё меньше их вокруг меня толпится,  
И грусть охватывает душу, как туман. . .  
Но не покой — Коуровка мне снится,  
И вновь в душе проснется ураган.

Когда глаза студентов предо мною,  
Не знающих, как время тяжело,  
Как миллигалы тяжелы порою,  
Становится, как в юности, светло.

И кажется, что заслужил я чести:  
Коуровка меня «удочерит»  
С Захаровой и Бархатовой вместе,  
Оправив наши имена в гранит.



# Список участников

ФИО	Организация	E-mail
Аввакумова Е. А.	ЦКО УрФУ	Ekaterina.Avvakumova@usu.ru
Акберов А. Р.	ИНАСАН	art@inasan.ru
Акимкин В. В.	ИНАСАН	akimkin@inasan.ru
Алексеева С. А.	ЦКО УрФУ	Sophy22@yandex.ru
Алексеев И. Ю.	НИИ КрАО	ilya@crao.crimea.ua
Артамонова А. В.	ЦКО УрФУ	mostcosmos@gmail.com
Безбородов М. А.	ВолГУ	mabezborodov@rambler.ru
Белей Д. А.	ТГУ	dmitry.beley@gmail.com
Беломестных С. С.	ЦКО УрФУ	belomestnyh.sergey@gmail.com
Бисикало Д. В.	ИНАСАН	bisikalo@inasan.ru
Бисноватый-Коган Г. С.	ИКИ РАН	gkgogan@iki.rssi.ru
Бобкова В. И.	ЦКО УрФУ	vera_bobkova2201@mail.ru
Боковиков А. А.	ЦКО УрФУ	Andrewbokovikov@gmail.com
Боли П. Э.	МРΙΑ	boley@mpia.de
Борисова Т. П.	СПбГУ	tanyaastro@mail.ru
Борокшопова О. Н.	ТГУ	oyuna89@sibmail.com
Бурданов А. Ю.	ЦКО УрФУ	artem.bourdanov@gmail.com
Бухмастова Ю. Л.	СПбГУ	bukh_julia@mail.ru
Васильев Е. О.	НИИФ ЮФУ	eugstar@mail.ru
Васюнин А. И.	UVa	anton.vasyunin@gmail.com
Веселков С. А.	СибГАУ	pulsar1963@yandex.ru
Вибе Д. З.	ИНАСАН	dwiebe@inasan.ru
Вибе Ю. З.	ЦКО УрФУ	wjulia@mail.ru
Вильянен В. В.	СибГАУ	vilyanen_valya@mail.ru
Галушина Т. Ю.	НИИ ПММ ТГУ	tanastra@nxt.ru
Гильмутдинова Я. В.	УрФУ	doc_office@usu.ru
Гирдюк Д. Е.	СПбГУ	gdevgenich@gmail.com
Гламазда Д. В.	АО УрФУ	antimuon@mail.ru
Голикова Ю. А.	УрФУ	salt26951995@gmail.com
Гомолко А. Н.	УрФУ	Antuano@mail.ru
Горда С. Ю.	АО УрФУ	Stanislav.Gorda@usu.ru
Данилов В. М.	УрФУ	vladimir.danilov@usu.ru
Дорогов А. А.	ЦКО УрФУ	dorogov.alexey@gmail.com
Дремова Г. Н.	РФЯЦ-ВНИИТФ	g.n.dryomova@mail.ru
Дроздов С. А.	ГАИШ МГУ	sai.drozдов@gmail.com
Дядина П. И.	ГАИШ МГУ	guldur@inbox.ru
Еремин М. А.	ВолГУ	ereminmikhail@gmail.com

ФИО	Организация	E-mail
Есипов В. Ф.	ГАИШ МГУ	gmr@sai.msu.ru
Заложных И. С.	ЦКО УрФУ	ivan.zalozhnih@gmail.ru
Захарова П. Е.	АО УрФУ	Polina.Zakharova@usu.ru
Зинченко И. И.	ИПФ РАН	zin@appl.sci-nnov.ru
Злобина Н. Ю.	ЦКО УрФУ	stilla2005@rambler.ru
Зубарев С. Н.	УрФУ	Sergey.cl@gmail.com
Ионов Д. Э.	ИНАСАН	ionovd@inasan.ru
Исаева А. А.	ГАИШ МГУ	is.stasya@yahoo.com
Кабанов А. А.	ИНАСАН	artkabanov@inasan.ru
Казанцев М. Б.	ЧелГУ	kazant@pochta.ru
Кайгородов П. В.	ИНАСАН	pasha@inasan.ru
Кайзер Г. Т.	УрФУ	galina.kajzer@usu.ru
Калинина Н. Д.	АО УрФУ	Nataliya.Kalinina@usu.ru
Карташова А. П.	ИНАСАН	akartashova@inasan.ru
Карукес Е. В.	ЮФУ	kkarukes@gmail.com
Касатов К. И.	ЦКО УрФУ	Nekro13-13@rambler.ru
Кауц В. Л.	АКЦ ФИАН	kauts@asc.rssi.ru
Квашнина А. В.	ЦКО УрФУ	Ro120.04@mail.ru
Кирсанова М. С.	ИНАСАН	kirsanova@inasan.ru
Кожевников В. П.	УрФУ	valerij.kozhevnikov@usu.ru
Кожевникова А. В.	АО УрФУ	kozhevnikova-a@yandex.ru
Колбасина И. В.	СибГАУ	Kabaskina@yandex.ru
Константинов А. О.	ЦКО УрФУ	izecson82@yandex.ru
Кочина О. В.	ИНАСАН	okochina@inasan.ru
Крушинский В. В.	ЦКО УрФУ	krussh@gmail.com
Кузнецов Э. Д.	АО УрФУ	Eduard.Kuznetsov@usu.ru
Курушина А. С.	ВолГУ	askurushina@gmail.com
Ладейщиков Д. А.	АО УрФУ	helioz@mail.ru
Лапухин Е. Г.	СибГАУ	slovoktk@mail.ru
Левитская Т. И.	УрФУ	Tatyana.Levitskaya@usu.ru
Левкина П. А.	ИНАСАН	ayvazovskaya@inasan.ru
Любимов В. Н.	ИНАСАН	llook@ya.ru
Любич М. О.	УГТ	lm@ugt.ur.ru
Макаренко Н. Г.	ГАО РАН	ng-makar@mail.ru
Маланчев К. Л.	ГАИШ МГУ	malanchev@physics.msu.ru
Малков О. Ю.	ИНАСАН	malkov@inasan.ru
Мартюшев Л. М.	УрФУ	leonidmartyushev@gmail.com
Медведев П. С.	МГУ	2medvedev@gmail.com
Медведева А. А.	ГАИШ МГУ	mizar-alcora@rambler.ru
Мигманова А. Э.	КФУ	sashulya.m@bk.ru



ФИО	Организация	E-mail
Мингалиев М. Г.	САО РАН	mingaliev@gmail.com
Млодик Г. Г.	УрФУ	mloidik_87@mail.ru
Моисеев А. В.	САО РАН	moisav@gmail.com
Наранович К. А.	СыктГУ	kseniya27021@rambler.ru
Овод Д. В.	СПбГУ	lluvias@rambler.ru
Овчинников А. И.	ЦКО УрФУ	terbium159@gmail.com
Оганесян Г. А.	ЮФУ	gorsoft@yandex.ru
Олонцев Р. Ф.	УрФУ	neyronikum@gmail.com
Орлов В. В.	СПбГУ	vor@astro.spbu.ru
Островский А. Б.	ЦКО УрФУ	Andrei.Ostrovskii@usu.ru
Павлюченков Я. Н.	ИНАСАН	pavyar@inasan.ru
Парфёнов С. Ю.	ЦКО УрФУ	grey1105@yandex.ru
Парфёнов С. Ю.	ЦКО УрФУ	grey1105@yandex.ru
Перминов А. С.	ЦКО УрФУ	perminov12@yandex.ru
Пилипенко С. В.	АКЦ ФИАН	spilipenko@asc.rssi.ru
Пономарева А. А.	ЮФУ	ponomareva.anastasiya@gmail.ru
Попов А. А.	ЦКО УрФУ	apopov66@gmail.com
Попова М. Э.	АО УрФУ	Maria.Popova@usu.ru
Прохоров М. Е.	ГАИШ МГУ	mike.prokhorov@gmail.com
Пузин В. Б.	ИНАСАН	vpuzin@inasan.ru
Пуланова А. Ф.	ЦКО УрФУ	PunanovaAnna@gmail.com
Путков С. И.	АО УрФУ	Putkov_S@mail.ru
Райков А. А.	ГАО РАН	raikov@mail.ru
Ромашин Г. С.	АО УрФУ	Georgij.Romashin@usu.ru
Ронжина А. А.	ЦКО УрФУ	virgo797@gmail.ru
Рыбак А. Л.	ГАО РАН	solarfish@alexeyryback.ru
Рыбин Д. В.	ЦКО УрФУ	den-wolf-666@mail.ru
Рябчикова Т. А.	ИНАСАН	ryabchik@inasan.rssi.ru
Салий С. В.	АО УрФУ	Svetlana.Salii@usu.ru
Сафутдинов Е. Р.	ГАИШ МГУ	yegorsaf@mail.ru
Седова М. С.	СыктГУ	1937@yandex.ru
Селезнев А. Ф.	АО УрФУ	Anton.Seleznev@usu.ru
Семенов Д. А.	МРІА	semenov@mpia.de
Серов А. В.	ООО	serov2000@gmail.com
Сидоренко В. В.	ИПМ им. М. В. Келдыша РАН	sidorenk@keldysh.ru
Скрипниченко П. В.	ЦКО УрФУ	savl-silverheart@rambler.ru
Смирнова К. И.	ЦКО УрФУ	Arashu@rambler.ru
Соболев А. М.	ЦКО УрФУ	andrej.sobolev@usu.ru
Соловьев А. А.	ГАО РАН	solov@gao.spb.ru

ФИО	Организация	E-mail
Сороквашин К. В.	ТГУ	astrodep@niipmm.tsu.ru
Старовойт Е. Д.	СибГАУ	narutoudzumaki@gmail.com
Судов Л. Н.	СПбГУ	l_sudov@mail.ru
Титаренко А. Р.	ГАИШ МГУ	2chlaidze@gmail.com
Толумбаева Д. А.	СПбГУ	g_e_r_d_a@mail.ru
Трещев М. А.	УрФУ	treschev.misha@gmail.com
Трушин Д. И.	ГАИШ МГУ	trushind@gmail.com
Угольников О. С.	ИКИ РАН	ougolnikov@gmail.com
Федоров В. Н.	ЮФУ	fv1970@list.ru
Фомин С. О.	ЧелГУ	zyozets@yandex.ru
Хайбрахманов С. А.	ЧелГУ	khaibrakhmanovsa@gmail.com
Хачай Ю. В.	ИГФ УрО РАН	yu-khachay@yandex.ru
Ходенков С. А.	СибГАУ	hsa_sibsau@mail.ru
Холщевников К. В.	СПбГУ	kvk@astro.spbu.ru
Хоперсков С. А.	ИНАСАН	khoperskov@inasan.ru
Храмцова М. С.	ИНАСАН	khramtsova@inasan.ru
Хусанова Я. И.	УрФУ	elephunka-bep@inbox.ru
Цыренжапова И. А.	ТГУ	iri6e4ko@sibmail.com
Чертułова Ю. И.	ЦКО УрФУ	yuliya.chertulova@mail.ru
Чулков Д. А.	ГАИШ МГУ	chulkovd@gmail.com
Шагабутдинов А. И.	АО УрФУ	Shgb-alik@yandex.ru
Шагабутдинов А. А.	ЦКО УрФУ	shag-andrey@yandex.ru
Шайдулин В. Ш.	СПбГУ	shvak@yandex.ru
Шаяпин Е. В.	УрФУ	tvi@dpt.ustu.ru
Шематович В. И.	ИНАСАН	shematov@inasan.ru
Шустов Б. М.	ИНАСАН	bshustov@inasan.ru
Щербина М. П.	ГАИШ МГУ	morskayaa906@yandex.ru
Элбакян В. Г.	ЮФУ	vardan.g.elbakyan@gmail.com
Эскин Б. Б.	СПбГУ	esk@astro.spbu.ru
Юшкин М. В.	САО РАН	maks@sao.ru
Юшков И. А.	ЦКО УрФУ	wave_hos@mail.ru
Янкелевич В. А.	ЮФУ	vik-yank@yandex.ru

## Содержание

<b>Материалы конференции</b>	<b>5</b>
<b>ОБЗОРНЫЕ ЛЕКЦИИ</b>	<b>7</b>
Боли П. Э. Европейская южная обсерватория и телескопы VLT на Паранале	7
Васюнин А. И. Межзвездные льды	19
Вибе Д. З., Храмцова М. С., Павлюченков Я. Н. Полициклические ароматические углеводороды	43
Галушина Т. Ю. Методы прогнозирования движения опасных для Земли астероидов и оценки вероятности столкновения	57
Зинченко И. И. Молекулы в ранней Вселенной	71
Кирсанова М. С. Индуцированное звездообразование в Галактике	81
Малков О. Ю. Международная виртуальная обсерватория: итоги первого десятилетия	92
Орлов В. В., Райков А. А. Космология: принципы и методы	104
Рябчикова Т. А. Химически пекулярные звезды	116
Семенов Д. А. Химия в протопланетных дисках	130
Соловьев А. А. «Одной звезды я повторяю имя...»	156
Угольников О. С. Атмосфера Земли: строение и оптика	158
Хачай Ю. В., Анфилов В. Н., Антипин А. Н. О возможном влиянии первичной атмосферы на распределение температуры в Земле при ее аккумуляции	177
Холшевников К. В., Шайдулин В. Ш. Точные оценки общего члена ряда Лапласа для гравитационного потенциала	186
Шустов Б. М., Кабанов А. А. Образование первых галактик	200
<b>ТЕЗИСЫ СТУДЕНЧЕСКИХ ДОКЛАДОВ</b>	<b>213</b>
Алексеева С. А., Парфенов С. Ю., Соболев А. М., Юшкин М. В. Происхождение звезды HD 37737 в ассоциации OB1 Aur	213
Безбородов М. А. Определение когерентных структур в газопылевой межзвездной среде	214
Белей Д. А. Разработка прикладной программной системы для визуализации вероятностной орбитальной эволюции астероидов	215
Борокшонова О. Н. Комбинированный способ отображения на заданный момент времени доверительных областей движения малых тел Солнечной системы	216
Бурданов А. Ю. Техника прецизионной ПЗС-фотометрии на телескопе МАСТЕР-II-Урал Коуровской астрономической обсерватории для изучения экзопланет	217

<b>Вильянен В. В., Колбасина И. В., Старовойт Е. Д., Ходенков С. А., Веселков С. А., Лапухин Е. Г.</b> Астрофизическая составляющая физического практикума в образовательных программах физико-технических направлений	218
<b>Исаева А. А.</b> Каталоги визуальных двойных звезд: корреляция, эффекты селекции, распределения систем по наблюдательным параметрам	219
<b>Карукес Е. В.</b> Особенности распределения звезд по металличности	220
<b>Курушина А. С.</b> Новые возможности моделирования бесстолкновительных звездных дисков на основе параллельных технологий CUDA	220
<b>Маланчев К. Л.</b> Нестационарная дисковая аккреция в рентгеновских новых	221
<b>Медведев П. С.</b> Моделирование области формирования линии HeII 4686 Å в системе SS 433	222
<b>Медведева А. А.</b> Движение звезд в тесных двойных системах с консервативным обменом масс	223
<b>Мигманова А. Э.</b> Определение орбиты визуально-двойной звезды ADS 9031 различными методами	224
<b>Парфенов С. Ю., Алексеева С. А., Соболев А. М.</b> Точность определения параметров горячих звезд по красной области спектра	225
<b>Пономарева А. А.</b> Аналог деления Кассини, наблюдаемого в диске Галактики по радиолинии 21 см	226
<b>Пуланова А. Ф., Крушинский В. В.</b> Исследование оптоволочного эшелле-спектрографа 1.2-м телескопа Коуровской астрономической обсерватории	227
<b>Скрипниченко П. В.</b> Оценка точности позиционных наблюдений и численных моделей движения астероидов	228
<b>Смирнова К. И., Моисеев А. В.</b> Новый каталог галактик с полярными кольцами	229
<b>Сорокашин К. В.</b> Исследование вероятностного алгоритма решения задач локальной геодинамики по данным ГЛОНАСС/GPS измерений	230
<b>Старовойт Е. Д., Колбасина И. В., Вильянен В. В., Веселков С. А., Лапухин Е. Г.</b> Новые переменные звезды в созвездии Lacerta	231
<b>Титаренко А. Р., Семенко Е. А., Рябчикова Т. А.</b> Химический состав и стратификация химических элементов в атмосфере Ар-звезды HD8441	232
<b>Трушин Д. И.</b> Определение начальной функции масс звезд с помощью распределений параметров двойных систем	233

<b>Цыренжапова И. А.</b> Особенности метода дифференциальных поправок в задачах улучшения параметров орбит . . . . .	234
<b>Янкелевич В. А.</b> Динамика шаровых скоплений в гравитационном потенциале нестабильной темной материи . . . . .	235
<b>ТЕЗИСЫ КРАТКИХ СООБЩЕНИЙ</b> . . . . .	236
<b>Акимкин В. В.</b> Диагностика ранних фаз эволюции протопланетных дисков . . . . .	236
<b>Борисова Т. П.</b> Возможные траектории столкновений с Землей астероида Апофис после 2036 г. . . . .	237
<b>Бухмастова Ю. Л.</b> Влияние гравитационного линзирования на функцию светимости квазаров . . . . .	238
<b>Дремова Г. Н.</b> Перспективы статистической астрономии . . . .	239
<b>Дремова Г. Н.</b> Статистическая обработка каталога Torgres . . .	240
<b>Ионов Д. Э., Бисикало Д. В., Кайгородов П. В., Шематович В. И.</b> Газодинамическое моделирование взаимодействия атмосферы экзопланеты со звездным ветром . . . . .	241
<b>Карташова А. П.</b> Метеорные наблюдения на Звенигородской обсерватории ИНАСАН в 2011 г. . . . .	242
<b>Кауц В. Л.</b> Аннигиляция темной материи вблизи компактных объектов . . . . .	243
<b>Кочина О. В., Вибе Д. З., Васюнин А. И.</b> Моделирование образования сложных молекул в протозвездных объектах .	244
<b>Ладейщиков Д. А., Ахматханова Г. Г., Соболев А. М.</b> Образуются ли звезды на границе туманности S 233? . . . .	245
<b>Левкина П. А., Бахтигараев Н. С., Чазов В. В.</b> Наблюдение малоразмерного космического мусора в Терскольской обсерватории в 2011 г. . . . .	246
<b>Любимов В. Н., Еремин М. А., Васильев Е. О.</b> Численное моделирование взаимодействия облака HI с ударной волной	247
<b>Овод Д. В.</b> О процессе стохастизации в гравитирующих системах	248
<b>Пилюпин С. В.</b> Факторы, определяющие внутреннее строение гало темной материи . . . . .	249
<b>Пузин В. Б.</b> Спектральные и фотометрические наблюдения и доплеровская томография катаклизмической переменной V455 Andromedae . . . . .	250
<b>Данилов В. М., Путков С. И.</b> О корреляциях в динамических моделях рассеянных звездных скоплений . . . . .	251
<b>Селезнев А. Ф.</b> Короны рассеянных звездных скоплений . . . .	252
<b>Судов Л. Н.</b> Решение уравнения Кеплера в близпараболическом случае . . . . .	253
<b>Толумбаева Д. А.</b> Определение первоначальных орбит внесолнечных планет методом лучевых скоростей . . . . .	254

<b>Хайбрахманов С. А.</b> Вертикальная структура стационарных аккреционных дисков с крупномасштабным магнитным полем	255
<b>Хоперсков С. А.</b> Галактические полярные кольца и форма темного гало . . . . .	256
<b>Шайдулин В. Ш.</b> Оценка некоторых характеристик модели геопотенциала EGM2008 . . . . .	257
<b>СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ . . . . .</b>	258
<b>Беломестных С. С., Злобина Н. Ю.</b> Применение многоспектральных снимков WorldView-2 для классификации хвойной и лиственной растительности . . . . .	258
<b>Горда С. Ю.</b> Решение сканерной кривой блеска SZ Cam . . . . .	259
<b>Захарова П. Е., Гламазда Д. В., Кузнецов Э. Д., Шагабудинов А. И.</b> Результаты наблюдений высокоорбитальных космических объектов на телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории в 2011 г. . . . .	260
<b>Кайзер Г. Т., Вибе Ю. З.</b> Эволюция орбит геосинхронных спутников «Горизонт» и STTW-T2 . . . . .	261
<b>Кабанов А. А.</b> Следы ранней химической эволюции галактик .	262
<b>Кожевников В. П.</b> Обнаружение затмений в катаклизмической переменной IPHAS J025827.88+635234.9 . . . . .	263
<b>Кожевникова А. В., Кожевников В. П., Алексеев И. Ю., Юшков И. А., Дорогов А. А.</b> Расположение активных долгот в двойной системе CG Cyg . . . . .	264
<b>Мартюшев Л. М., Шаяпин Е. В., Зубарев С. Н.</b> Расчет производства энтропии для ряда рассеянных звездных скоплений с возрастом от 0.005 до 1.699 млрд лет . . . . .	265
<b>Перминов А. С.</b> Исследование особенностей орбитальной эволюции спутников Земли в окрестности резонанса 1:2 при больших значениях парусности . . . . .	266
<b>Ромашин Г. С.</b> Гирационный радиус . . . . .	267
<b>Ронжина А. А., Крушинский В. В., Попов А. А.</b> Создание и модернизация интерфейсов управления для приборов Коуровской астрономической обсерватории . . . . .	268
<b>Рыбак А. Л.</b> Пространственно-временная организация солнечной активности . . . . .	269
<b>Салий С. В., Соболев А. М., Зинченко И. И.</b> Молекулярные сгустки в S255 IR в радиолиниях метанола . . . . .	270
<b>Эскин Б. Б.</b> Резонансы в небесной механике . . . . .	271

<b>Из истории науки</b>	<b>273</b>
Левитская Т. И. Михаил Сергеевич Молоденский и его роль в современных представлениях о фигуре Земли . . . . .	275
<b>Литературные страницы</b>	<b>281</b>
Калинина Н. Д. Полине Евгеньевне Захаровой на 70-летие . .	283
Соловьев А. А. Предчувствие Января . . . . .	284
Холшевников К. В. Элегия . . . . .	285
<b>Список участников</b>	<b>287</b>

Научное издание

**Физика Космоса**

Труды 41-й Международной  
студенческой научной конференции  
Екатеринбург,  
30 января — 3 февраля 2012 г.

Редактор Т. А. Федорова  
Оригинал-макет — Э. Д. Кузнецов, А. Б. Островский, С. В. Салий

Подписано в печать 20.01.11. Формат 60 × 84 1/16.  
Бумага для множительных аппаратов. Гарнитура Times.

Усл. печ. л. 17,38.

Тираж 150 экз. Заказ 19.

Издательство Уральского университета  
620000, Екатеринбург, пр. Ленина, 51.

Отпечатано в ИПЦ УрФУ  
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4.  
Тел. (343) 350-56-64.

ISBN 978-5-7996-0666-4

